

**POLİETİLEN TEREFTALAT (PET) ATIKLARININ
POLİMERİZASYON İLE ELDE EDİLEN ÜRÜNLERİNİN ASFALT
BETONLARINDA KULLANABİLİRLİĞİ**

Seyyed Ali FARZANIAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2013

ANKARA

Seyyed Ali FARZANIAN tarafından hazırlanan POLİETİLEN TEREFTALAT (PET) ATIKLARININ POLİMERİZASYON İLE ELDE EDİLEN ÜRÜNLERİNİN ASFALT BETONLARINDA KULLANABİLİRLİĞİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Müh. Anabilim Dalı

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

.....

Tez Danışmanı, Kimya Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

.....

İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK

.....

İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

.....

Kimya Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Hülagü KAPLAN

.....

Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Yusuf DEMİREL

.....

İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi : 02 /07/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SARIOĞLU

.....

Fen Bilimler Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Seyyed Ali FARZANIAN

**POLİETİLEN TEREFTALAT ATIKLARININ POLİMERİZASYON İLE
ELDE EDİLEN ÜRÜNLERİNİN ASFALT BETONLARINDA
KULLANABİLİRLİĞİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Seyyed Ali FARZANIAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2013

ÖZET

Dünya yol istatistikleri incelendiğinde yük ve yolcu taşımacılığında karayoluna olan talebin sürekli artan bir eğilim gösterdiği izlenmektedir. Karayolu ulaşımını sağlamak için farklı özelliklere sahip çeşitli üstyapı türleri kullanılmaktadır. Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de karayolları en çok esnek üstyapı şeklinde projelendirilip uygulanmaktadır.

Esnek üstyapılarında trafik, iklim ve çevre şartlarına bağlı olarak farklı bozulmalar meydana gelmektedir. Bitümlü sıcak karışımların niteliğini arttırmak ve bakım-onarım maliyetini azaltmak için günümüzde kullanılmakta olan bitümlerin özelliklerini modifiye ederek gerek bağlayıcının gerekse karışımın performansının artırılmasına çalışılmaktadır.

Bu çalışmada bitüm katkı maddeler ile modifiye edilerek bitüm ve bitümlü karışımların performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda pet şişeleri (polietilen tereftalat – PET) kimyasal bir prosesten geçilerek katkı maddeleri elde edilmiştir. Katkı maddeler sıvı (ince akışkan poliol) ve katı (viskoz poliol) şeklinde olarak ve %1, %2, %3, %5, %10 oranlarında bitüme ilave edilip konvansiyonel (penetrasyon testi, yumuşama noktası testi, düktilite

testi) ve superpave (dönel viskozite, dinamik kayma reometresi (DSR), çubuk eğme reometresi (BBR)) testleri ile incelenmiş, ayrıca agrega-bitüm karışımındaki etkileri Marshall stabilite testi, Nicholson soyulma testleri ile birlikte irdelenmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde katkı maddelerinin ilavesiyle bitüm ve bitümlü karışımların performansında değişimler gözlemlenmiştir. Buna göre, modifiye edilmiş bitümün düşük sıcaklıklarda oluşabilecek çatlaklara karşı direnci artmıştır. Bununla birlikte katkı maddelerinin seçilen oranlarda, bitümün yaşlanmaya karşı direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirmiştir. Katkılı bitümlü karışımların soyulmaya karşı dirençli olduğu ve Marshall stabilite değerlerinin arttırdığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 911.1.134

Anahtar Kelimeler : Bitüm, Bitümlü karışımlar, Modifiye bitüm, İnce akışkan poliol, Viskoz poliol, Esnek üstyapı performansı

Sayfa Adedi : 177

Tez Yöneticileri : Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

**THE USABILITY OF WASTE POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)
PRODUCTS OBTAINED BY POLIMERIZATION IN ASPHALT
CONCRETES**

(M.Sc. Thesis)

Seyyed Ali FARZANIAN

**GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

July 2013

ABSTRACT

World road statistics analysis showed that demands for freight and passenger transportation in roads are increasing. It is necessary to provide different kinds of pavement to use in roads. As well as the world, in Turkey the roads are projected and applied as flexible pavement.

In flexible pavement different distortions occur because of traffic, climatic and environment conditions. To improve the quality of hot mix asphalt and to reduce the cost of maintenance and repair it, today by modifying the performance of binding material and mixtures, their properties are increasing.

Our purpose in this study is modifying bituminous by adding additive materials to improve the performance of bituminous and bituminous mixtures. In this regard our additive materials are acquired from pet bottles (Polyethylene terephthalate – PET) through a chemical process. Additive materials are used in the form of fluid (tiny fluid Polyol) and solid (viscose Polyol) by %1, %2, %3, %5, %10 percentage added to bituminous and with conventional (penetration tests, softening point tests, ductility tests) and superpave examination (viscosity tests, dynamic shear rheometer (DSR) tests,

bending beam rheometer (BBR) tests) also the effect of aggregate-bituminous mixture with (Marshall tests and Nicholson stripping tests) were investigated.

The test result analysis indicates that change was observed by adding additive materials to bituminous and bituminous mixtures. Accordingly modified bitumen resistance is increased toward cracks that happen in low temperatures. Also the amount of additives materials in selected portion reduced bitumen aging but bitumen fatigue strength is increased. It is observed increase in stripping resistance and the stability of bitumen mixtures.

Science Code : 911.1.134

Key Words : Bituminous, bituminous mixtures, modified bitumen, tiny fluid polyol, viscose polyol, flexible pavement performance

Page Number : 177

Advisers : Assist. Prof. Dr. Kürşat ÇUBUK

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin ilk gününden beri ilgi ve desteğini esirgemeyen, tez çalışmamın tüm aşamalarında karşılaştığım her sorunla başa çıkabilme yeteneği kazandıran, aynı zamanda manevi desteklerini her zaman hissettiğim hocam Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK'a ve Hocam Prof. Dr. Metin GÜRÜ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince görüş ve önerileri ile çalışmaya katkıda bulunan, bende ayrı bir yeri olan ve abim saydığım Dr. Deniz ARSLAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen laboratuvar uzmanı Sayın Musa ÇALIŞIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren, burada olmamı sağlayan, hayatımın her evresinde sevgilerini kalbimde hissettiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak Gazi Üniversitesi Öğretim Üyelerine, Atatürk öğrenci yurdu arkadaşlarıma ve okulda beni yalnız bırakmayan tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xvi
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Bitümlü Bağlayıcılar	4
2.1.1. Bitümün kimyasal bileşemi	9
2.1.1. Bitümün yapısı	12
2.1.1. Bitümün reolojisi	14
2.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	14
2.2.1. Penetrasyon deneyi	15
2.2.2. Yumuşama noktası deneyi	15
2.2.3. Viskozite deneyi	15
2.2.4. Düktilite deneyi	16
2.2.5. Trikloretilende çözünürlülük	16
2.2.6. İnce filim halinde ısıtma kaybı deneyi	17
2.2.7. Parlama noktası deneyi	17
2.2.8. Nicholson soyulma deneyi	17
2.2.9. Marshall deneyi	18

Sayfa

2.3. Asfaltın Davranışı ve Sınıflandırılması	19
2.4. Asfalt Özelliklerinin Tayininde Yeni Yaklaşımlar	22
2.4.1 Döner ince filim etüvü	23
2.4.2. Basınçlı yaşlandırma kabı	23
2.4.3.Dönel viskozite reometresi	23
2.4.4.Dinamik kayma reometresi	24
2.4.5.Eğilme kırış reometresi	27
2.4.6. Doğrudan çekme cihazı	28
2.5. Bitümün Özellikleri	28
2.5.1. Bitümün rijitlik modülü	28
2.5.2. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığı	29
2.5.3. Bitümün kohezyonu	30
2.5.4. Bitümün adezyonu	30
2.5.5. Bitümün dayanaklılığı	31
3. ESNEK ÜST YAPILAR	33
3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlar	34
3.1.1. Stabilite	35
3.1.2. Dayanaklılık	36
3.1.3. Fleksibilite	36
3.1.4. Rijitlik	37
3.1.5. Yorulma mukavemeti	37
3.1.6. İşlenebilirlik	37
3.2. Esnek Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar	38
4. BİTÜM MODİFİKASYONU VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	41
4.1. Literatür Araştırması	43

Sayfa

5. MATERYAL VE METOT	51
5.1. Malzeme	51
5.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddesi	51
5.3. Metot	53
5.4. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması	53
5.5. Bitüm Ve Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deneyler	54
5.5.1. Marshall deneyi	54
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	56
6.1. Viskozite Test Sonuçları	56
6.1.1. Orijinal bitümün viskozite test sonuçları	56
6.1.2. İnce akışkan poliol (İAP) ile modifiye edilmiş bitümlerin viskozite test sonuçları	58
6.1.3. Viskoz poliol (VP) ile modifiye edilmiş bitümlerin viskozite test sonuçları	63
6.2. Penetrasyon Test Sonuçları	69
6.3. Yumuşama Noktası Test Sonuçları	70
6.4. Düktilite Test Sonuçları	71
6.5. Nicholson Soyulma Test Sonuçları	72
6.6. Marshall Test Sonuçları	73
6.7. DSR (Dynamic Shear Rheometer) test sonuçları	77
6.8. BBR (Bending Beam Rheometer) test sonuçları	80
7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	87
EKLER	93

Sayfa

EK- 1	Penetrasyon test cihazı	94
EK- 2	Yumuşama noktası test cihazı	95
EK- 3	Düktilite test cihazı	96
EK- 4	Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)	97
EK- 5	Viskozite test cihazı	107
EK- 6	Katkı maddeleri	108
EK- 7	Agrega ve bitüm özgül ağırlık tayini	109
EK- 8	Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri	115
EK- 9	Briket hacmine bağlı düzeltme faktörleri	116
EK-10A	İnce akışkan poliol (İAP) katkı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler	117
EK-10B	İAP'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim	122
EK-11A	Viskoz poliol (VP) katkı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler	124
EK-11B	VP'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim	129
EK-12	Marshall briketleri	131
EK-13	Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	132
EK-14	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri	133
EK-15	%1 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	136
EK-16	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 İAP Marshall tasarım grafikleri	137
EK-17	%2 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	140
EK-18	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 İAP Marshall tasarım grafikleri	141

Sayfa

EK-19	%3 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	144
EK-20	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 İAP Marshall tasarım grafikleri	145
EK-21	%5 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	148
EK-22	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 İAP Marshall tasarım grafikleri	149
EK-23	%10 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	152
EK-24	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 İAP Marshall tasarım grafikleri	153
EK-25	%1 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	156
EK-26	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 VP Marshall tasarım grafikleri	157
EK-27	% 2 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	160
EK-28	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 VP Marshall tasarım grafikleri	161
EK-29	%3 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	164
EK-30	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 VP Marshall tasarım grafikleri	165
EK-31	%5 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	168
EK-32	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 VP Marshall tasarım grafikleri	169
EK-33	%10 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları	172
EK-34	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 VP Marshall tasarım grafikleri	173
EK-35	Superpave test cihazları	176
ÖZGEÇMİŞ		177

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. KGM'nin sorumluluğunda bulunan yol ağı uzunluğunun satıh cinsine göre dağılımı (km)	2
Çizelge 2.1. Bitümün kimyasal kompozisyonu	10
Çizelge 2.2. Asfalt çimentolarına ait penetrasyon sınıflandırması	20
Çizelge 2.3. Superpave bağlayıcı deneyleri ve kullanım amacı	22
Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan bazalt türü agreganın kimyasal özellikleri	51
Çizelge 5.2. Tip 1 gradasyon dağılımı ve tasarımda kullanılan şartname değerleri	55
Çizelge 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite ölçümleri	57
Çizelge 6.2. Orijinal ve İAP katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	58
Çizelge 6.3. Modifikasyon sonucu orijinal viskoziteye göre oransal ve miktar değişimi	62
Çizelge 6.4. Orijinal ve VP katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	63
Çizelge 6.5. Modifikasyon sonucu orijinal viskoziteye göre oransal ve miktar değişimi	65
Çizelge 6.6. Bitüme eklenen katkı maddesi türü ve miktarına göre plent sıcaklıkları (°C)	68
Çizelge 6.7. Orijinal ve modifiye bitümlere ait penetrasyon sonuçları	69
Çizelge 6.8. Orijinal ve modifiye bitümlere ait yumuşama noktaları	70
Çizelge 6.9. Orijinal ve modifiye bitümlere ait düktilite sonuçları	71
Çizelge 6.10. Orijinal ve modifiye bitümlere ait Nicholson soyulma test sonuçları	72
Çizelge 6.11. Agregaya ait özgül ağırlık değerleri	73

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.12. Briketlerde kullanılan orijinal bitüm oranına bağlı olarak Marshall tasarımında elde edilen ortalama değerler	74
Çizelge 6.13. Orijinal bitümün optimum değeri	74
Çizelge 6.14. İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin optimum bitüm miktarı	75
Çizelge 6.15. VP ile modifiye edilmiş bitümlerin optimum bitüm miktarı	75
Çizelge 6.16. Orijinal ve İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin stabilite değerleri	76
Çizelge 6.17. Orijinal ve VP ile modifiye edilmiş bitümlerin stabilite değerleri ...	76
Çizelge 6.18. Yaşlandırılmamış bitümlerin G^* ve δ değerleri	78
Çizelge 6.19. RTFO sonrası G^* ve δ değerleri	78
Çizelge 6.20. PAV sonrası G^* ve δ değerleri	78
Çizelge 6.21. Yaşlandırılmamış bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri	79
Çizelge 6.22. RTFO sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri	79
Çizelge 6.23. PAV sonrası $G^*\times\sin\delta$ değerleri	79
Çizelge 6.24. BBR test sonuçları	81
Çizelge 6.25. BBR test sonuçları	81
Çizelge 7.1. İnce akışkan poliolun bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler	83
Çizelge 7.2. Viskoz poliolun bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bitüm üretiminin şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Bir bitüm emülsiyonun şematik gösterimi	8
Şekil 2.3. Bitüm parçacıklarını kaplayan yüklerin şematik gösterimi	9
Şekil 2.4. Sol tipi bitüm	12
Şekil 2.5. Jel tipi bitüm	13
Şekil 2.6. Asfaltın farklı sıcaklıklardaki kıvamı	21
Şekil 2.7. Asfaltın zaman ve sıcaklığa göre davranışı	21
Şekil 2.8. Dönel viskozimetrenin şematik görünümü	24
Şekil 2.9. Isıtmalı kapta deneyin işleyişi	24
Şekil 2.10. Dinamik kayma reometre testi	25
Şekil 2.11. Bitümün viskoelastik davranışı	26
Şekil 2.12. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi	26
Şekil 3.1. Yüksek standartlı esnek üstyapılara ait tipik enkesit	33
Şekil 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	57
Şekil 6.2. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite Değişimleri	59
Şekil 6.3. Bitüm viskozitesinin İAP konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi	
a. (90°C -110°C arasında)	60
b.(120°C -140°C arasında)	61
c. (150°C -160°C arasında)	61
Şekil 6.4. Orijinal ve VP katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri .	64

Şekil**Sayfa**

Şekil 6.5. Bitüm viskozitesinin VP konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi

a. (90°C –110°C arasında).....	65
b. (120°C -140°C arasında)	66
c. (150°C -160°C arasında)	66

RESİMLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Resim 2.1. Trinidadat göl asfaltı	6
Resim 3.1. Esnek üstyapıda oluşan tekerlek izi bozulması	39
Resim 3.2. Esnek üstyapılarda düşük sıcaklık sebebiyle oluşan çatlamlar	40

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
G^*	Kompleks kesme modülü
δ	Faz açısı
PI	Penetrasyon indeksi
gr	Gram
Δt	Zaman aralığı
θ	Rotasyonel açı
S	Sünme rijitliği
m	Sünme oranı
s	Saniye
km	Kilometre
τ	Bitümlü sıcak karışımın kayma mukavemeti

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Asfalt çimentosu
BBR	Eğilme kirişi reometresi
BSK	Bitümlü sıcak karışımlar
Dp	Pratik yoğunluk
DSR	Dinamik kesme reometresi
EVA	Etilen vinil asetat
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
İAP	İnce akışkan poliol
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
PAV	Basınçlı yaşlandırma kabı
PET	Polietilen tereftalat
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
RTFO	Döner ince film etüvü
RV	Dönel viskozite
SBS	Stiren butadien stiren
SHRP	Stratejik karayolu araştırma programı
SMA	Taş mastik asfalt
TFOT	İnce film halinde ısıtma deneyi
Vf	Bitümle dolu boşluk oranı
Vh	Boşluk oranı
VMA	Agregalar arası boşluk oranı
VP	Viskoz poliol

1.GİRİŞ

Ulaştırma, insan ihtiyaçlarının temini için insanların ya da yüklerin yer ve zaman bakımından fayda sağlayacak şekilde yer değiştirmesi olarak ifade edilebilir. Yer değişimini sağlamak için farklı sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler genel olarak havayolu ulaşımı, su yolu ulaşımı ve karayolu ulaşımına ayrılır. Karayolu taşımacılığı, üretim yerinden tüketim mahalline aktarmasız ve hızlı taşıma yapılmasına uygun olması nedeniyle, diğer taşıma türlerine göre daha fazla tercih edilmektedir.

Karayolu üstyapısı değişik tabakalardan oluşur. Bu tabaklar, proje ömrü boyunca emniyetli bir şekilde ve her türlü iklim koşulları altında hizmet verebilmelidir. Üstyapılar genel olarak; esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilmektedir ve bunların içerisinde esnek üstyapılar günümüzde daha çok tercih edilebilmektedir. Esnek üstyapılar trafik hacmine ve kompozisyonlarına bağlı olarak düşük standartlı ve yüksek standartlı şekilde yapılırlar. Yüksek standartlı esnek üst yapılar çok tabakalı yapı olup trafik hacminin yüksek olduğu kesimlerde kullanılmaktadır.

Son yıllarda sosyal ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak, karayollarındaki araç sayısında hızlı bir artış meydana gelmiştir. Bu suretle daha ekonomik, daha güvenli ve sürüş kalitesi daha yüksek kaplamaların sürekliliği için yol üstyapılarının daha yüksek performanslı ve bozulmalara karşı daha dirençli olarak tasarlanması zorunlu hale gelmiştir [1].

Türkiye’de 2013 yılı itibarıyla Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) sorumluluğunda bulunan yol ağı uzunluğunun yol sınıfı ve satıh cinsine göre dağılım değerlerinin sunulduğu Çizelge 1.1’de görülmektedir.

Çizelge 1.1. KGM'nin sorumluluğunda bulunan yol ağı uzunluğunun satıh cinsine göre dağılımı (km) [2].

Yol Sınıfı	Asfalt Beton	Sathi kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer	Toplam Uzunluk
Otoyollar	2127	-	-	-	-	-	2127
Devlet Yolları	11240	1963	73	112	29	290	31375
İl Yolları	1910	26831	183	957	637	1362	31880
Toplam Uzunluk	15277	46462	256	1069	666	1652	65382

Çizelge 1.1'de görüldüğü üzere Türkiye'deki KGM'nin 2013 yılı itibariyle sorumluluğu altında bulunan otoyolları, devlet yolları ve il yolları toplam uzunluğu 65382 km olup bunun 15277 km'si yüksek standartlı esnek üst yapısı, 46462 km'si düşük standartlı üst yapı türündendir. Görüldüğü üzere Türkiye'deki yolların %94.43'ü bitümlü karışımlarla inşa edilmiş yüksek veya düşük standartlı esnek yapılardır.

Karayolu esnek üstyapıları, üzerine gelen hareketli ve sabit yükleri, bünyesindeki çeşitli tabakalardan geçirerek, yüzeysel temas halinde olduğu taban zemine ileten, alttan üste doğru nitelik ve taşıyıcılık bakımından daha iyi malzemelerden inşa edilen bir üstyapı tipidir. Aynı zamanda bir esnek üstyapı, trafiği güvenli olarak ve ekonomik bir şekilde taşımak zorundadır. Bir yüksek standartlı esnek üstyapı, proje ömrü, trafik hacmi, mevcut malzeme durumu ve taban zemini dayanımı gibi kriterler göz önünde bulundurularak tabakalı olarak projelendirilir. Bu tabakalar; kaplama tabakası (aşınma ve binder), temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemini olarak adlandırılır [3].

Kaplama tabakaları bitümlü sıcak karışımla imal edilir. Bitümlü sıcak karışım (BSK) sıcak agrega karışımının ısıtılmış asfalt çimentosu ile homojen olarak karıştırılıp, kaplanması ile elde edilir [4]. BSK' ları katı (agrega), sıvı (asfalt) ve gaz (boşluk) olmak üzere üç fazlı makrokolloidal bir sistem olarak düşünmek mümkündür [5]. Termoplastik ve viskoelastik bir malzeme olarak sıvı fazı oluşturan bitüm düşük sıcaklıklarda, özellikle kısa süreli yüklemelerde, elastik özellik gösterirken

yüklemenin uzun süreli olduğu durumlarda viskoz davranış gösterir. Termoplastik malzemeler ise yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler [6]. Bitümün bu özellikleri dahil, bitümlü sıcak karışımlarda da tasarım-imalat-malzeme koşulları ve/veya trafik-iklim-çevre etkilerine bağlı olarak çeşitli bozulmalar/kusurlar oluşabilmektedir. Bunlar deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlamlar olmak üzere üç grupta toplanabilir. Deformasyon tipi bozulma olan tekerlek izi ile çatlak tipi bozulma olan yorulma çatlakları ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar esnek üstyapılarda görülen önemli bozulmalardır [7]. Bu nedenle esnek kaplamalarda çok sık karşılaşılan deformasyonların giderilmesi ve kaplamaların yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliği, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliği sağlaması için bitüm veya agrega-bitüm karışımları katkı maddeleri ile modifiye edilerek özelliklerinin geliştirilmesi önemlidir [8].

Bu çalışma kapsamında tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlakların önlenmesi ve üstyapı performansının artırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda doğada atık madde olarak kolayca bulunabilen ve ek maliyet oluşturmeyen pet şişeler (polyethylene terephthalate-PET) kimyasal bir prosesten geçirilerek farklı akıcılıkta katkı maddesi sentezlenmiştir. Elde edilen katkı maddeleri bitümle karıştırılarak bitüm modifiye edilmiştir. Literatürde PET ile yapılmış çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmalarda PET şişeleri ısıtıldığında akıcı hale gelmediğinden dolayı doğrudan agrega-bitüm karışımına ilave edilmiştir [9-10]. Bu çalışmada ise pet şişe, literatür çalışmalarından farklı olarak doğrudan bitüm modifiyeri olarak kullanılmıştır. Elde edilen yeni modifiyer ile değişik oranlarda modifiye edilen bitüm ve agrega-bitüm karışımına uygulanan test sonuçlarıyla tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara yönelik uygun katkı maddesi miktarı belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİ

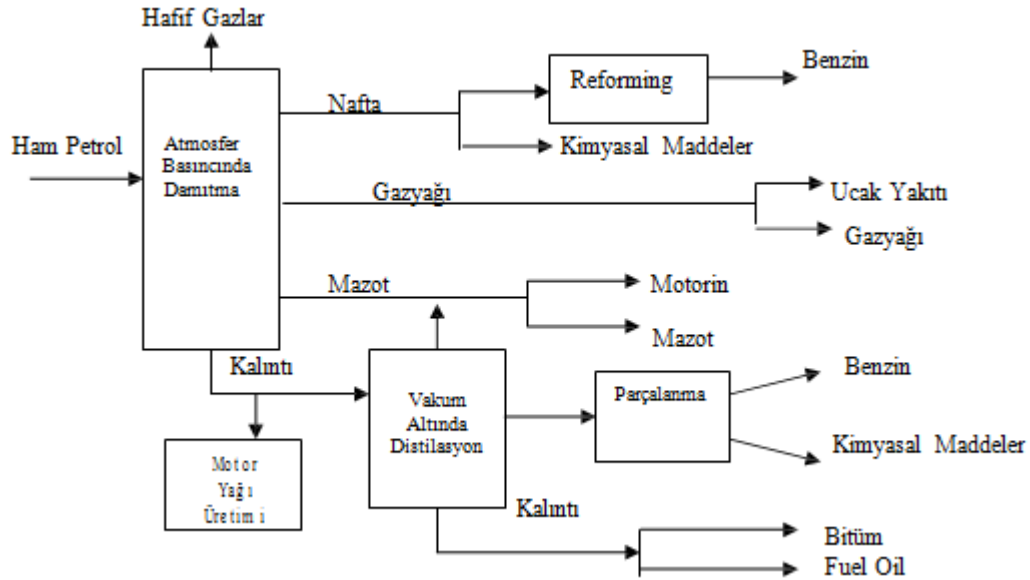
Esnek üstyapı kaplamalarında kullanılan geleneksel karışım malzemeleri agrega ve bitümdür. Bitüm, aynı zamanda kaplamanın hizmet ömrü ve dış etkilere karşı direnç özellikleri açısından da önemli roller üstlenir. Karışım içerisindeki ağırlıkça oranı %5 civarında olmasına karşın, maliyeti en çok etkileyen malzeme de bitümdür. Dolayısıyla bitüm oranının düşürülmesi karışım maliyetlerini belirli oranlarda düşürecekken, bitüm performansını arttıracak başka bir malzemenin karışıma ilave edilmesi karışım performansını iyileştirecektir [11].

2.1. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, yol üst yapısında kullanılan en önemli bağlayıcıdır. Doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup, çok defa bunların gaz, sıvı, yarı katı ya da katı olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır [12]. Yol kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcılar; bitkisel kökenli kömürden elde edilen katranlar, hayvansal kökenli petrolden elde edilen asfaltlardır [5].

Katran, başlıca kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde damıtılmasıyla elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Katranlar daha ziyade arıtıldıktan sonra kullanılırlar. Üstyapı tabakalarında bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir [12]. Kömür ham katranın damıtılmasıyla hafif yağ, karbolik yağ, naftalin yağ, yıkama yağ, antrasen yağ ve zift elde edilir[13].

Bitüm, genel olarak doğal kaynaklıdır. En zengin bitüm kaynağı ise ham petroldür. Sekil 2.1’de ham petrolden bitüm üretiminin basit bir şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.1. Bitüm üretiminin şematik gösterimi [1].

Asfaltlar koyu kahve renkten- siyaha kadar değişen, kuvvetli bağlayıcı özelliği olan, kıvamlılık bakımından katı, yarı katı ve sıvı olabilen, doğal halde bulunan veya ham petrolün damıtılmasından elde edilen ve başlıca hidrokarbondan oluşan bir maddedir. Asfaltlar, doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir [13]. Doğal asfaltlar petrolün yeryüzüne çıkması ve zamanla distile olmasından meydana gelen asfalttır. Kaya asfalt, gilsonit asfalt ve göl asfaltı doğal olarak bulunan asfalt türleridir.

Kaya asfalt çok poroz kayaların absorbe ettiği petrolün zamanla uçucu maddelerinin kaybı sonucu oluşur. Bu tip kayalarda %20'ye varan asfalt bulunmaktadır [5]. Kaya asfaltlar Türkiye'de Güney Anadolu'da, Fransa'nın Gard bölgesinde, İsviçre'nin Val de Travers bölgesindeki Neuchatel'de, İtalya'nın Ragusa bölgesinde bulunmaktadır [1]. Diğer kaya asfalt türü göl asfaltıdır. Resim 2.2'de görülen Trinidad göl asfaltı en yaygın kullanılan göl asfaltıdır. Trinidad adası Venezüella sınırlarında Güney Amerika'dadır. Rezervi 10-15 milyon tondur. Rafine edildikten sonra yaklaşık %55 asfalt içerir [14].



Resim 2.1. Trinidad göl asfaltı

Dünyada bundan başka göl asfaltları da bulunmaktadır. Bir başka doğal asfalt türü olan gilsonit asfaltı pratik olarak saf doğal asfalt olup çok serttir [15]. Gilsonit, rafineri bitümü içerisinde katkı maddesi olarak kullanılabilir [16].

Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılmasından elde edilir. Rafineride petrolün distilasyon (ayırışma) ile elde edilen yapay asfaltlar, asfalt çimentoları, okside asfalt, sıvı petrol ve asfalt emülsiyonlarına ayrılır [5].

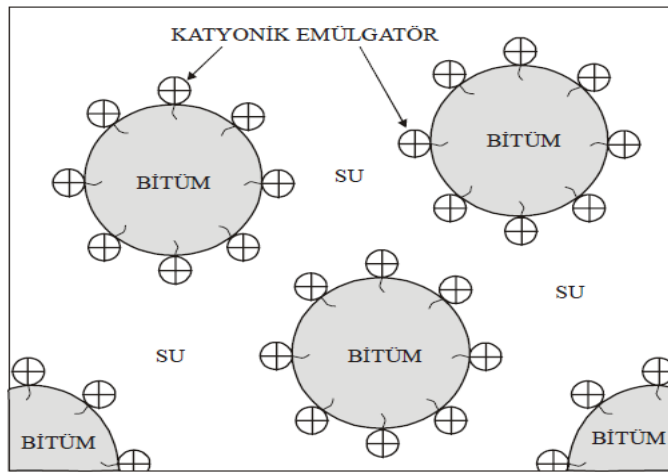
Yol üst yapısında kullanılan asfalt çimentoları, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bitümlü kaplamalarda kullanmak üzere hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır. Asfalt çimentoları penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılırlar. Asfalt çimentoların kıvamlılığını belirleyen penetrasyonu 10-300 arasında değişir [12].

Okside asfaltlar ise asfalt ısıtılıp içerisine hava üfleyerek üretilir. Bu tip asfaltlar normal distilite edilmiş asfaltlara nazaran daha katı yani daha düşük penetrasyonludur. Fakat ısıya duyarlılığı daha azdır [5]. Okside asfaltlar genellikle kaplamalarda kullanılmaz. Daha özel amaçlar için yalıtım işlerinde, elektrik, otomobil veya boya sanayisinde kullanılır [13].

Sıvı petrol asfaltlar ısıtılmış asfalt bağlayıcıya benzin, gazyağı ya da yağ karıştırılmasıyla üretilirler. Asfalt bağlayıcıya benzin katılmasıyla çabuk kür olan RC sıvı petrol asfaltları, gazyağı ilavesiyle orta hızda kür olan MC sıvı petrol asfaltları ve yağ ilavesiyle yavaş kür olan SC sıvı petrol asfaltları üretilir. Sıvı petrol asfaltlar türlerine göre, astar tabakası, yapıştırma tabakası, sathi kaplama ya da soğuk karışımlarda kullanılırlar [14].

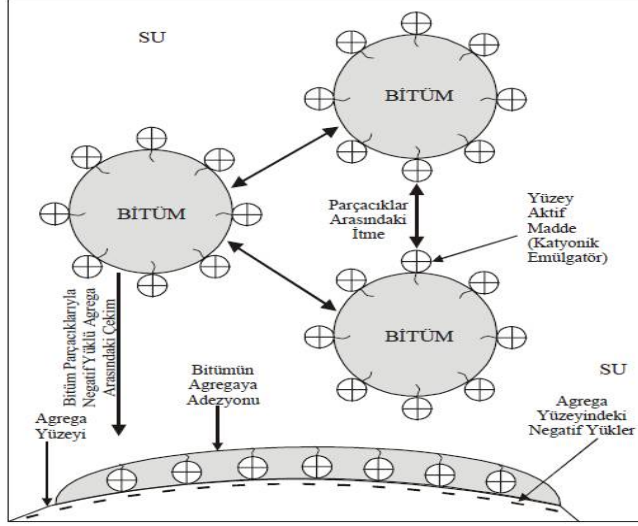
Bitüm emülsiyonu, bitümün su içerisinde çok küçük parçacıklar halinde dağılmış halidir. Parçacıkların çapları genellikle 1 ila 5 mikron (1mikron = 0.001mm) arasında değişmektedir. İyi bir emülsiyon, görünüşte kaygan ve genellikle kahverengidir. Emülsiyon, 20. yüzyılın başlarında ticari olarak üretilmeye başlanmış ve yol inşaatında, bakımında ve zemin stabilizasyonunda kullanılmıştır. Bitüm emülsiyonları imalatı için, her derecedeki penetrasyon değerine sahip asfalt kullanılabilir. Fakat, inşa edilmiş yolların çoğunda 100 ile 200 penetrasyon derecesine sahip asfalt kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda enerji ve çevre problemleri bu tür malzemelerin kullanımının daha da arttırılması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Emülsiyonların kullanımında diğer likit asfaltlarda kullanılan damıtılmış petrol ürünlerinin (gazyağı, mazot, petrol vs.) kullanılmaması ve imalatı için sıcak karışımlara göre daha düşük sıcaklığa ihtiyaç duyulmasından dolayı enerji kullanımını azaltır. Aynı zamanda damıtılmış petrol ürünlerinin kullanılmaması çevre kirliliğini de azaltır. Bitüm emülsiyonu; bitüm, su ve emülgatör olmak üzere üç bileşenden oluşur. Yol inşaatında kullanılan emülsiyon Şekil 2.2. de gösterildiği gibi, dış faz olarak su ve iç faz olarak bitüm içermektedir. Bitüm parçacıkları, emülgatör olarak adlandırılan "sümfaktan" yardımıyla süspansiyon halinde bulunurlar. Bitüm ve su çok değişik içerikteki iki sıvıdır. Bitüm su içinde ince bir şekilde dağılır ve büyük ölçüde suyun özelliklerine sahip bir emülsiyon oluşturur. Bu emülsiyonda, bitüm ayrı bir faz olarak bulunmaz. Emülsiyona istenilen oranda su katılarak formüle edilebilir. Bitüm emülsiyondan kimyasal bir reaksiyon (kesilme) vasıtasıyla ayrılabilir. Sadece bu kesilme işlemi boyunca gerçek bir bitüm fazı oluşturulur. Bitüm, bir bitüm emülsiyonun ana unsurudur ve emülsiyonun %50-70 lik kısmını oluşturur. Bitümün bazı özellikleri, emülsiyonun özelliklerini önemli

ölçüde etkiler. Her ne kadar baz bitümün sertliği geniş bir alanda değişebilirse de çoğu emülsiyonlar 100 ile 250 arasındaki penetrasyon değerine sahip bitümle üretilmektedir. Bazı durumlarda, iklim şartları daha sert veya daha yumuşak bir bitüm kullanımını zorlar. Şartlar ne olursa olsun stabil bir emülsiyon üretimi için bitüm ile emülgatörün uygunluğu esastır. Bitüm emülsiyonunun özellikleri, büyük ölçüde emülgatör olarak kullanılan kimyasallara bağlıdır. Bu kimyasallar, genellikle sürfaktan (kapiler aktif madde) olarak adlandırılan yüzey aktif maddelerdir. Bu maddeler, emülsiyonun anyonik, katyonik veya noniyonik olmasını belirleyen faktördür. Ayrıca emülgatörler, bitüm parçacıklarını stabil süspansiyon halinde tutar ve bitümün agrega yüzeyinde uygun zamanda birikmesini sağlar.



Şekil 2.2. Bir bitüm emülsiyonun şematik gösterimi

Şekil 2.3. de gösterildiği gibi, emülgatörün pozitif katyonik kısmı, negatif yüklü agrega yüzeyi ile kuvvetli bir elektrostatik bağ oluşturur [17].



Şekil 2.3. Bitüm parçacıklarını kaplayan yüklerin şematik gösterimi

Su, bir bitüm emülsiyonunda ikinci büyük unsurdur. Su ıslatmayı ve çözmeyi temin ederek kıvamı artırır. Su, stabil bir bitüm emülsiyonun üretimi için faydalı veya zararlı olabilecek mineraller veya maddeler içerebilir. Bundan dolayı kullanılacak suyun üretilen emülsiyona uygun olması gerekmektedir.

Yolda kullanılan asfalt emülsiyonları;

- Çabuk kesilen (RS) asfalt emülsiyonları
- Orta hızda kesilen (MS) asfalt emülsiyonları
- Yavaş kesilen (SS) asfalt emülsiyonları

olmak üzere üçe ayrılır [13]. Anyonik asfalt emülsiyonları, kesilme hızlarına göre başlıca bu harf guruplarıyla belirtilirken katyonik asfalt emülsiyonları aynı harf guruplarının başında katyonik olduklarını belirtmek üzere C harfinin de kullanılmasıyla ifade edilmektedir [7].

2.1.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi

Bitümlü bağlayıcılar çok karmaşık kimyasal yapıya sahiptirler, ancak her ne kadar damıtmaya maruz kaldığında kimyasal yapısında değişimler olsa da, kimyasal karakter bakımından orijinal kaynağının yani ham petrolün özelliklerin çok yakındır.

Asfalt ve katranlar organik temellidir ve yüksek moleküllü hidrokarbonlar olarak tanımlanabilmektedirler. Asfaltlar katranlara göre daha karmaşık bir kimyasal yapıya sahiptir. Kaplama bitümünün kimyasal birleşimi temel olarak hidrokarbonlar, oksijen-nitrojen ve sülfür temelli birleşiklerden oluşmaktadır. Bitüm, hidrokarbon molekülleri ile yapısal olarak benzer heterosiklik türler ve kükürt, oksijen ve azot atomları içeren fonksiyonel grupların kompleks bir kimyasal karışımıdır [1]. Bitüm aynı zamanda çok az miktarda oksitler ve inorganik tuzlar ya da kalsiyum, nikel, demir, vanadyum ve magnezyum gibi metaller de içermektedir. Ham petrolün bitümlü ürünlerinin analiz sonuçlarına göre bitümün kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.1’de verilmiştir [13].

Çizelge 2.1. Bitümün kimyasal kompozisyonu

Element	Kütle yoğunluk oranı (%)
Karbon	82-88
Hidrojen	8-11
Kükürt	0-6
Oksijen	0-1,5
Nitrojen	0-1

Bitümün kompozisyonu, elde edildiği ham petrolün kaynağına ve sonra imalat sırasında yapılan işlemler ile kullanma süresince meydana gelen oksitlenmeye göre değişiklik arz etmektedir.

Bitümün çözücülere göre ayrılan kısımlarının moleküler ağırlığını ölçmek ve bitümün kimyasal bileşiminin tespiti için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar;

- Çözücü kullanılması,
- İnce şekilde bölünmüş katılar tarafından absorpsiyon ve filtreleme yoluyla absorbe edilmiş çözeltinin ayrılması,
- Moleküler damıtma,
- Kromatografi,

Yukarıdaki yöntemler içinde kromatografi daha çok kullanılmakta olup temeli, başlangıçta n-heptan kullanarak asfaltenleri çöktürmek ve bundan sonra kalan malzemenin kromatografik ayrımını yapmaya dayanır. Fakat bitümü asfaltenler ve maltenler olarak adlandırılan iki geniş kimyasal gruba ayırmak mümkündür. Maltenler bitümün n-heptanda çözülen kısmıdır. Doymuş hidrokarbonlar, aromatikler ve reçinelere ayrılır. Aromatik ve doymuş hidrokarbonlar viskoz sıvılar olup bitüme bağlayıcılık özelliğini sağlayan reçineler ise yarı-katı, polar malzemelerdir [18].

Asfaltenler, karbon ve hidrojenden oluşan ve bir miktar azot, kükürt ve oksijen içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen oldukça yüksek molekül ağırlığına sahip, polar (elektriksel yüklere sahip) siyah veya kahverengi amorf katılardır. Asfaltenler bitümün % 5 ile % 25 ini oluşturmakta ve miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir [1]. Asfalten miktarının artırılması ile daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip, daha sert ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir [19].

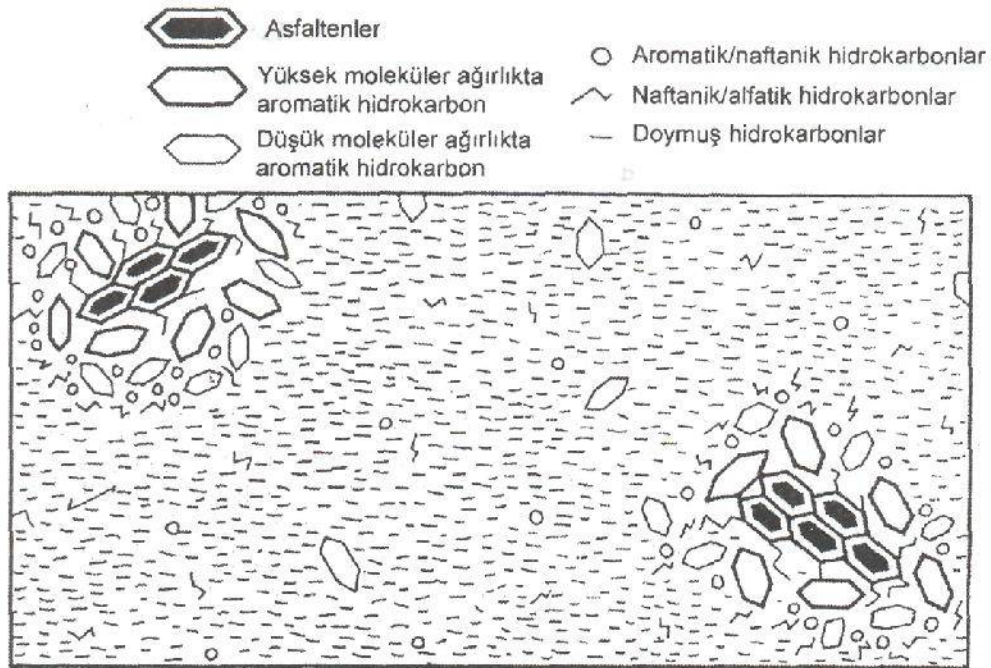
Reçineler, n-heptan içerisinde çözünen, asfaltenler gibi geniş oranda hidrojen ve karbondan oluşmuş ve az miktarda oksijen, kükürt ve azot içeren maddeler olup, koyu kahverengi renkte katı ya da yarı katılardır. Reçinelerin elektriksel olarak oldukça yüklü olmaları, reçinelerin güçlü bir yapışkan olmalarını sağlamaktadır[1]. Asfaltenlerin ve reçinelerin dağılımı bitümlerin solüsyon (SOL) veya jelatin (GEL) karakterde olmasını belirler. Bitümlü bağlayıcının yaşlanmasıyla içerisinde bulunan reçine miktarının arttığı bilinmektedir [19].

Aromatikler bitüm içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı naftanik aromatik bileşenlerden oluşur. Bitüm içerisine dağılmış asfaltenlerin yayılımları için gereken ortamın büyük kısmını teşkil ederler. Aromatikler, bitümün % 40 ila % 65 ini oluşturan koyu kahverengi, viskoz sıvılar olup, doymamış halka sistemlerin hakim olduğu polar olmayan karbon zincirlerinden oluşurlar [1].

Doygun hidrokarbonlar, alkil-naftenler ve bazı alkil-aromatikler ile birlikte düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardır. Bunlar saman veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlar olup, hem parafinik hem de naftanik yağ halkalarını içerir. Doygun hidrokarbonlar bitümün % 5 ila % 20'sini oluşturmaktadır [1].

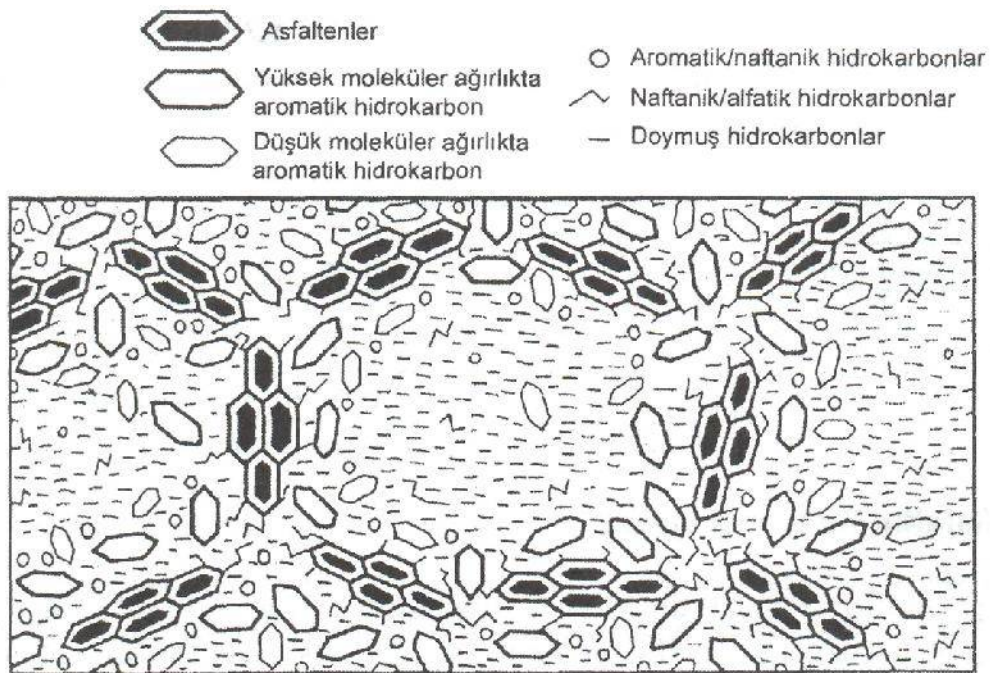
2.1.2. Bitümün Yapısı

Bitüm, aromatikler ve doymuş hidrokarbonların içinde yayılı halde bulunan reçinelerle çevrili asfaltenlerden oluşmuş kollidal bir sistem olarak tarif edilebilmektedir [18]. Asfalten damlacıkları, asfaltenlerin etrafını bir kılıf gibi çeviren yüksek molekül ağırlıklı aromatik reçinelerdir. Damlacıkların merkezinden uzaklaştıkça, daha düşük elektriksel yüklere sahip aromatik reçineler bulunmaktadır. Yeterli miktarda aromatikler ve reçineler bulunduğunda asfaltenler tamamen dağılır ve oluşan damlaların bitüm içerisindeki hareketliliği oldukça iyi olur. Bunlar çözelti ya da SOL tipi bitümler olarak adlandırılır [1].



Şekil 2.4. Sol tipi bitüm [15]

Yeterli miktarda aromatik ve reçine bileşenleri mevcut değilse ya da bu bileşenler yeterli çözücü güce sahip değilse asfaltenler birbirleriyle daha da ilişkili olabilmektedir. Bunun sonucunda damlaların birbirleriyle bağlantılı olduğu ve içlerindeki boşluklarda diğer maddelerden (doymuş hidrokarbonlar, vs.) oluşan sıvıyla dolmuş bir yapı meydana gelir. Bu bitümler ise jelatinli veya JEL tipi bitümler olarak adlandırılmaktadır. Bunlara en iyi örnek, çatı kaplamalarında kullanılan oksitlendirilmiş bitümler verilebilir [1].



Şekil 2.5. Jel tipi bitüm [15]

Bitümü oluşturan bileşenlerin birbirlerine göre konsantrasyonları ve kolloidal özellikte olan bitüm yapısı içerisinde gösterdikleri dağılım ve yayılım, bitümün sahip olduğu fiziksel özellikleri etkilemektedir. Bununla beraber farklı kimyasal yapıya sahip bitümler benzer fiziksel özellikler sergileyebildiği gibi [1] aynı rafineride aynı ham petrolün işlenmesiyle elde edilen bitümler arasında davranış özelliklerinde farklılaşma görülebilmektedir [15].

2.1.3. Bitümün reolojisi

Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunu sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca bu yükün uygulanma süresini dikkate alarak belirlemeye çalışan bir bilimdir. Bitüm, reolojik bir malzeme olduğu için yük altında davranışı, üzerine uygulanan yüke ve bu yükün uygulanma süresine bağlıdır [20]. Ayrıca, bitüm termoplastik bir malzemedir ve bu yüzden sıcaklık değişimlerine karşı da duyarlıdır. Termoplastik malzemeler ise yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler [6]. Üstelik bitümler visko-elastik malzemelerdir ve gerilme altındaki deformasyonları yükleme süresi ve ısıнын fonksiyonudur. Çok düşük sıcaklıklarda ve kısa süreli yüklemelerde, elastik özellik gösterirken yüksek sıcaklıklarda ya da uzun yükleme sürelerinde viskoz davranış gösterirler[12].

2.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler, bağlayıcının teknik şartnamelerde istenilen kurallara uygun olup olmadığının belirlenmesi için yapılır. Genel olarak bitümlü bağlayıcılara uygulanan bazı deneyler aşağıda belirtilmiştir [12];

1. Penetrasyon (TS 118 EN 1426)
2. Yumuşama noktası (TS 120 EN 1427)
3. Viskozite (ASTM D 4402-87)
4. Düktilite (TS EN 13398)
5. Trikloretilende çözünürlük (TS 1090 EN 12592)
6. İnce film halinde ısıtma (TS EN 12607-2)
7. Parlama noktası (TS 1080, TS EN ISO 2592, TS 1171)
8. Nicholson soyulma deneyi
9. Marshall deneyi

2.2.1. Penetrasyon deneyi

Bitümlü bağlayıcıların kıvamlılığı penetrasyon deneyi ile tayin edilir. Penetrasyon; standart bir iğnenin belirli yük altında, belirli süre içinde, belli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultuda batma uzunluğudur. Penetrasyon birimi 0,01cm'dir. penetrasyon cihaz göstergesindeki her taksimat 0,1mm'ye eşittir. Penetrasyon değeri 500'e kadar olan bitümlü bağlayıcılarda numuneye 25°C sıcaklıkta 5 saniye süre ile 100 gr'lık bir yük uygulamaktadır. Penetrasyonu 500'ün üzerinde olan numuneler için deney 15°C'de yapılmakta ve şartlar değişmektedir[12]. EK-1'de penetrasyon ölçümlerine ait fotoğraflar sunulmuştur.

2.2.2. Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklık karşısındaki davranışları farklılıklar göstermektedir. Bitümlü maddelerin yumuşaması belli bir sıcaklıkta gerçekleşmez. 25°C sıcaklıkta aynı penetrasyona sahip 2 bitümlü bağlayıcı numunesi farklı sıcaklıkta farklı özellikler gösterebilirler [12]. Yumuşama noktası yüksek olan bitümlü bağlayıcının sıcaklık değişimlerine daha dayanıklıdır. Dolayısıyla kaplamada kullanılan bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası düşükse viskoz davranış ve kalıcı deformasyon erken başlar [20]. Ayrıca yumuşama noktası yüksek bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda tekerlek etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Tekerlek izi oluşumuna hassas olan karışımlar için yumuşama noktası sıcaklığı tekerlek iziyle iyi bir korelasyon sağladığı ve yumuşama noktasındaki 5-6 °C lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı belirtilmektedir [21]. Bitümlü bağlayıcılarda yumuşama noktasını ölçmek için halka ve bilye metodu kullanılmaktadır. EK-2'de yumuşama noktası ölçümlerine ait fotoğraflar sunulmuştur.

2.2.3. Viskozite deneyi

Viskozite deneyi petrol ürünlerinin ve yağların kıvamlılığını tayin etmek için

uygulanır. Bitümlü bir maddenin viskozite değeri yükseldikçe kıvamlılığı artmakta yarı katı hale geçmektedir. Saybolt viskozitesi, standart bir tüp içine konulan bitüm numunesinin belirlenen deney sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra 60 cm^3 hacmindeki toplama kabını doldurulması için geçen zamanın saniye cinsinden değeridir. Viskozite deneyi sırasında tüp olarak universal delikli tüp kullanılıyorsa saybolt universal, furol delikli tüp kullanılıyorsa saybolt furol viskozite adını alır. Furol viskozitesi universal viskozitenin yaklaşık olarak onda biridir [12].

2.2.4. Düktilite deneyi

Düktilite deneyi, bitümlü bağlayıcıların uzama kabiliyetini göstermektedir. Bitümlü bir maddenin düktilitesi; standart bir kalıpta hazırlanmış bitüm numunesinin bir ucundan çekilerek uzatılması sonucunda koptuğu andaki mesafenin cm cinsinden ifadesidir [12]. Bitümün bağlama yeteneği düktilitesine bağlı olup, düktilite değeri yüksek olan bitümlerin bağlayıcılık özellikleri de yüksek olmaktadır. Ancak, çok yüksek düktilite değerine sahip bitümlerin ısıya karşı fazla duyarlılık gösterdiği belirtilmektedir [21]. Deney şartlarının bildirilmediği durumlarda deney $25 \pm 0,5^\circ C$ sıcaklıkta $5 \pm 0,25$ cm/dk'lık çekme hızı ile gerçekleşir [12]. EK-3'te düktilite ölçümlerine ait fotoğraflar sunulmuştur.

2.2.5. Trikloretilende çözünürlük

Bu deney, içerisinde mineral madde bulunmayan ya da çok az bulunan bağlayıcıların organik çözücüler içerisinde çözünürlüğünü belirlemek için yapılır. Bu organik çözücüler, trikloretilen, karbon sülfür, benzen gibi çözücülerdir [21]. Bitümlü bağlayıcının bünyesindeki mineral maddeler çözücü içinde çözülmecektir. Bitüm en az %99 oranında çözülmeli yani, bitümün içinde en fazla %1 oranında mineral madde olmalıdır [15].

2.2.6. İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi

İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT), bitüm tesislerinde agrega ile bitüm karıştırıldığı zaman meydana gelen yaşlanmayı temsil etmektedir [23]. Bu deney ile 0,32 cm kalınlığında bir asfalt filminin 5 saat süre ile 163°C sıcaklıkta ısıtılması sonucunda kütlelerinde oluşacak kayıp tespit edilmektedir. Bitümlü malzemelerin ısı ve havadaki oksijen etkisiyle özellikle penetrasyon ve düktilite değerlerinde oluşacak değişimler bu yöntemle belirlenebilmektedir [12].

2.2.7. Parlama noktası deneyi

Bu deney parlama noktası 79°C'nin üstünde olan petrol ürünlerine uygulanır. Parlama noktası ısıtılan deney numunesini, buharına deney alevinin temas ettirilmesi sonucunda numunenin parladığı fakat yanmadığı en düşük sıcaklıktır. Petrol ürünlerinin parlama noktalarının bilinmesi özellikle uygulamalar sırasında doğabilecek tehlikelerin önlenmesi açısından çok önemlidir [12].

2.2.8. Nicholson soyulma deneyi

Bir bitümlü kaplamanın ömrü ölçüde agreganın suyun etkisine karşı direnç kabiliyeti ile yakından ilişkilidir. Soyulma, suyun ve trafiğin etkisiyle bağlayıcı maddenin agrega üzerinden ayrılması demektir. Kırılmış agrega numunesinin 9,5 – 4,75 mm'lik elekler arasında kalan kısmından yaklaşık 200 gr alınır, iyice yıkanır sonra 110°C etüvde kurutulur. Yıkanır kurutulmuş agregadan 30±0,5 gr alınarak bir saat 110°C'lik etüvde bekletilir. Öte yandan 1,5±0,1 gram bitümlü malzeme, 250 cm³ beher içinde 110°C'lik kum banyosuna yerleştirilerek ısıtılır. Daha sonra agrega ve bitüm homojen bir şekilde kum banyosu üzerinde karıştırılıp 24 saat 60°C'lik etüvde bekletilir. Bu sürenin sonunda beher etüvden çıkarılıp kum banyosunda hafifçe ısıtılıp 10 cm çapında petri kabına aktarılıp sonra kap saf su ile doldurulup üzeri cam kapakla kapatılarak tekrar 24 saat 60°C'lik etüvde bekletilir. Bu sürenin sonunda petri kabı dışarı çıkarılıp suyu boşatılır ve yandan gelen ışık

altında karışımın yüzeyi incelenir [12]. EK-4'te soyulma deneyine ait fotoğraflar sunulmuştur.

2.2.9. Marshall deneyi

Bitümlü karışımlarda, bitüm yüzdesi, karışımın fiziksel karakteristikleri ve kaplamanın uzun ömürlü olması açısından önemlidir. Gereğinden fazla bitüm karışımda stabilite problemlerine neden olurken, gereğinden az bitüm de karışımın durabilitesini düşürmektedir [8]. Sıcak bitümlü karışımların stabilitesi son derece karmaşık olup belirli bir değerle ifade etmek mümkün olmamaktadır. Ancak bir takım testler (Marshall, Hveem, vb) ile relatif bir stabilite değeri tayin edilmektedir [7].

Marshall stabilite deneyi, aynı agreg a karışımına farklı oranlarda bağlayıcı karıştırarak; maksimum stabiliteyi veren optimum bağlayıcı miktarının saptanması, bitümlü karışımdaki boşluk oranlarının belirlenmesi ve kuru agreg a karışımındaki boşlukların bağlayıcı ile doldurulma oranlarının hesaplanması için yapılan deneydir. Marshall metodu ile dizayn kavramı, Birleşik Devletler, Mississippi Devlet Otoyolları Departmanında çalışan Bruce Marshall tarafından geliştirilip formüle edilmiştir. Birleşik Devletler Mühendislik Şirketinin ileri araştırma ve korelasyon çalışmalarıyla, Marshall Deney Yöntemi geliştirilerek bugün kullanılan son halini almıştır. Daha sonra bu dizayn yöntemi, “American Society for Testing and Materials” tarafından, standartlaştırılmıştır.

Marshall Yöntemi, maksimum boyutu 25 mm (1 inç) veya daha küçük agreg a içeren ve penetrasyon veya viskozite ile sınıflandırılmış bitümlü bağlayıcı kullanılan BSK kaplamalara uygulanmaktadır [7]. Deneyde uygun gradasyonlu agreg a ve belli penetrasyona sahip bitümlü bağlayıcı seçildikten sonra agreg aların (kaba, ince ve filler) ve bitümün özgül ağırlığı hesaplanır. EK-7'de özgül ağırlığına ait bilgiler verilmiştir.

Deney sonuç eğrilerinin optimum değeri gösterebileceği değişik bitüm yüzdesinde bir seri deney numunesi hazırlanır. 101,6 mm (4 inç) çapında ve 63,5 mm (2,5 inç) yüksekliğinde standart deney numuneleri kullanılır. Bu deney numuneleri bitüm- agrega karışımının ısıtılması, karıştırılması ve sıkıştırılması için belirlenmiş bir yöntem uygulanarak hazırlanır. Sıkıştırma işlemi, 18 inç yükseklikten serbest düşen 4,536 kg ağırlıktaki tokmak darbeleri ile gerçekleştirilir. Darbe sayısı; tabaka cinsi (aşınma, binder veya bitümlü temel), trafik kompozisyonu ve miktarı ve yol kesimine göre 50 ve 75 sayı arasında değişebilmektedir. Sıkıştırılma sonrası 2,5 inçten farklı yüksekliğe sahip briketler için stabilite ölçümleri, briketlerin yüksekliklerine veya hacimlerine bağlı olan uygun faktörlerle çarpılmaları suretiyle düzeltilir. Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri EK-8'de ve briket hacmine bağlı düzeltme faktörleri EK-9'da verilmiştir.

Deney numuneleri, optimum değerinin altında ve üstünde olmak üzere en az iki değişik bitüm yüzdesinde hazırlanır. Deney sonuçlarının sağlıklı olması için kullanılan her bitüm yüzdesinde en az üç deney numunesi hazırlanır. Belli bir kür süresini takiben, elde edilen silindirik numunelerin (Marshall briketleri) yükseklikleri ölçülür ve farklı ortam ve koşullarda ağırlıkları tartılır (havada, suda ve suya doymun halde). Tartım sonuçları ve diğer veriler ile yoğunluk ve hacim hesaplamaları yapılır. Daha sonra briketler, standarda uygun şartlar altında, Marshall Test Cihazında denenerek stabilite ve akma değerleri bulunur. Akma, yükleme uygulanan numunede düşey yönde oluşan deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Akma değeri, test cihazından doğrudan alınırken, stabilite değeri, düzeltme faktörü ile düzeltilerek alınır [7,14].

2.3. Asfaltın Davranışı ve Sınıflandırılması

Bitümlü bağlayıcıları sınıflamak veya derecelendirmek için günümüzde üç önemli sistem mevcuttur. Bunlar [7,18];

- Penetrasyon sınıflandırması

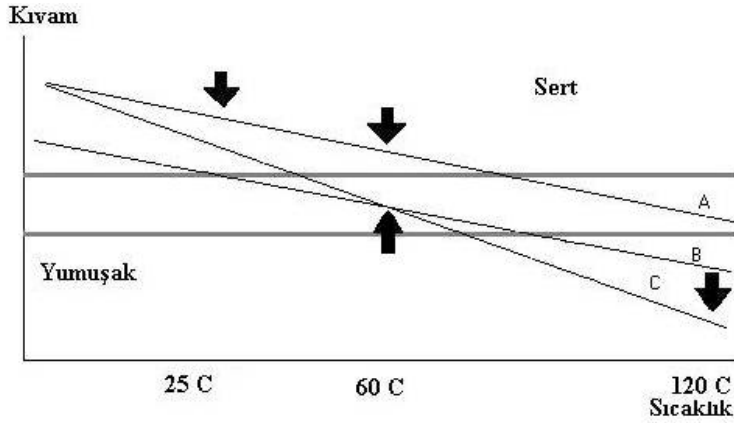
- Viskozite sınıflandırması
- Performans sınıflandırması

olarak sıralanabilir. Kimyasal ve fiziksel özellikleri birbirlerinden farklı olan çok sayıda bitümlü bağlayıcı bulunmaktadır. Farklı özelliklere sahip bu bağlayıcılar yukarıda belirtilen sistemlerden uygun olanı/olanları kullanılarak sınıflandırılabilir. Örneğin asfalt çimentoları her üç sistem ile (penetrasyon, viskozite, performans) sınıflandırılabilirken sıvı asfaltlar (katbek ve emülsiyonlar) viskozite değerlerine göre sınıflanabilmektedir [7]. Türkiye’de halen kullanılan bitüm sınıflandırma sisteminde, bitümün penetrasyon değerleri esas alınmaktadır. Çizelge 2.2’de asfalt çimentolarına (bitüm) ait penetrasyon sınıflandırması verilmiştir.

Çizelge 2.2. Asfalt çimentolarına ait penetrasyon sınıflandırması [4]

Penetrasyon Sınıflandırması	
20-30	Pen. AC
30-45	Pen. AC
35-50	Pen. AC
40-60	Pen. AC
50-70	Pen. AC
70-100	Pen. AC
100-150	Pen. AC
160-220	Pen. AC
250-330	Pen. AC

Bitümlü bağlayıcılar için yapılan penetrasyon sınıflandırması deneysel bir metottur ve bağlayıcının kullanım karakteristiği veya performans özellikleri hakkında gerçekçi bilgi vermez. Sadece belli bir sıcaklıkta hangi bağlayıcının daha yumuşak veya daha sert olduğu belirlenebilir [18]. Şekil 2.6’da, üç adet asfalt numunesinin farklı sıcaklıklardaki kıvamları gösterilmektedir [24].



Şekil 2.6. Asfaltın farklı sıcaklıklardaki kıvamı [24]

Görüldüğü gibi, 25°C’de her üç numune sert olarak nitelendirilecek bir kıvamdadır. Değişen sıcaklık şartlarında A ve B asfaltları birbirine benzer bir değişim gösterirken, C asfaltı sıcaklığın etkisiyle A ve B asfaltlarına oranla daha hızlı yumuşama göstermektedir. 60 °C’de penetrasyonları aynı olan B ve C asfaltlarından C asfaltı, düşük sıcaklıklarda B’den daha sert iken, yüksek sıcaklıklarda B’den daha yumuşaktır [25]. Asfalt sınıfları penetrasyon değerine göre aynı olsa da, farklı sıcaklıklardaki davranışları farklı olmaktadır. Asfaltın davranışı, maruz kaldığı sıcaklık ve yük/yükleme hızına göre değişiklik gösterir. Yavaş yüklemenin (yavaş hareket eden veya duran trafik yükleri) yapacağı etkiyi yüksek sıcaklıklardaki davranışla, hızlı yüklemeyi ise düşük sıcaklıklardaki davranışla temsil etmek mümkündür. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, asfalt çimentosundaki 60°C’de 1 saatlik akış miktarı ile 25°C’deki 10 saatlik akış miktarı birbirine eşdeğerdir [24,26-27].



Şekil 2.7. Asfaltın zaman ve sıcaklığa göre davranışı [26]

Viskozite sınıflandırması ise bitümlü bağlayıcının en azından kullanım karakteristiği hakkında bilgi veren temel derecelendirme sistemidir. Viskozite sınıflandırma sisteminde, AC harf grubu ile asfalt çimentosu (Asphalt Cement) ifade edilmekte olup harf grubunu takip eden sayılarla da asfalt çimentoları farklı sınıflara ayrılmaktadır. Sınıflandırmada kullanılan sayılar asfalt çimentosunun 60°C’de poise biriminden sahip olduğu viskozitenin %1’ini ifade eder [7]. Bunlar AC40– AC20- AC10- AC5- AC2.5 olarak ayrılırlar.

2.4. Asfalt Özelliklerinin Tayininde Yeni Yaklaşımlar

Asfalt bağlayıcılarının kıvamlılıkları yerine performans esasına dayalı olarak sınıflandırmak amacıyla son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) adı verilen yeni bir karışım tasarımı yöntemi ile yeni deneylerin geliştirilmesine çalışılmıştır. Bunlar ABD Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) çerçevesinde superpave bağlayıcı şartnamesi olarak hazırlanmıştır. Superpave şartnamesinin en önemli özelliği belirtilen kriterlerin sabit kalması ancak kriterlerin uygulanacağı sıcaklığın değişmesidir. Superpave deneyleri malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili fiziksel özelliklerini ölçer [24-25].

Çizelge 2.3. Superpave bağlayıcı deneyleri ve kullanım amacı [24]

Deney Aleti	Kullanım Amacı
Döner ince film etüvü (RTFO)	Bağlayıcının oksitlenmesini (yaşlanmasını) ya da sertleşmeyi temsil eder.
Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)	
Dönel viskozimetre (RV)	Yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı özelliklerini ölçer.
Dinamik kayma reometresi (DSR)	Orta ve yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı özelliklerini ölçer.
Eğilme kirişi reometresi (BBR)	Düşük sıcaklıklarda bağlayıcı özelliğini ölçer.
Doğrudan çekme cihazı (DTT)	

2.4.1. Döner ince film etüvü (Rolling Thin Film Oven- RTFO)

Asfalt bağlayıcılar iki değişik faktörden dolayı yaşlanırlar. Bunlardan biri asfalt içindeki hafif yağların buharlaşması, diğeri ise havadaki oksijen ile reaksiyon neticesinde oluşan oksidasyondur. Plentte ve serim esnasındaki harmanlama ve karıştırma işlemi sırasında, yüksek sıcaklık ve hava akışı olması nedenleriyle, her iki olay da meydana gelir ve asfaltın yaşlanmasına katkıda bulunur. Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) şartnamesi, bu olayı temsil eden döner ince film deneyini gerekli görür. Deneyin amacı, oksidasyon sonrasında buharlaşan kütle kaybını belirlemek ve daha sonra yapılacak diğer performans deneyleri için yaşlanmış numune elde etmektir [25-27].

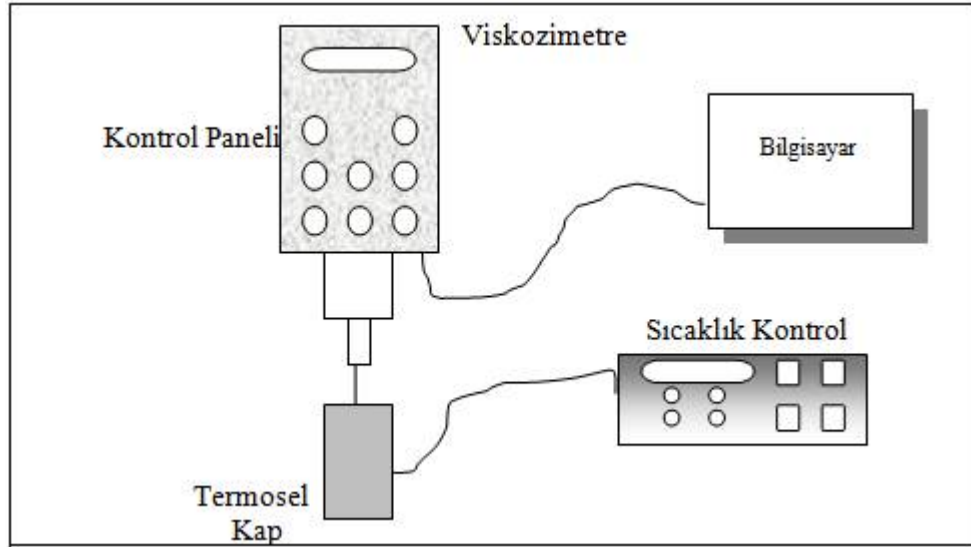
2.4.2. Basınçlı yaşlandırma kabı (Pressure Aging Vessel- PAV)

Bu deneyde, uzun süreli yaşlanmayı temsil etmek üzere, asfalt numunesi bir basınç kabına konarak etüvde 20 saat süreyle sıcaklık ve basınç etkisinde bırakılır. Deneyde kullanılacak asfalt, döner ince film etüvü deneyinde kullanılmış olan asfalt numunesi olacaktır. Böylece kaplamanın inşaat ve hizmet sırasında karşılaşacağı çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olur [25-27].

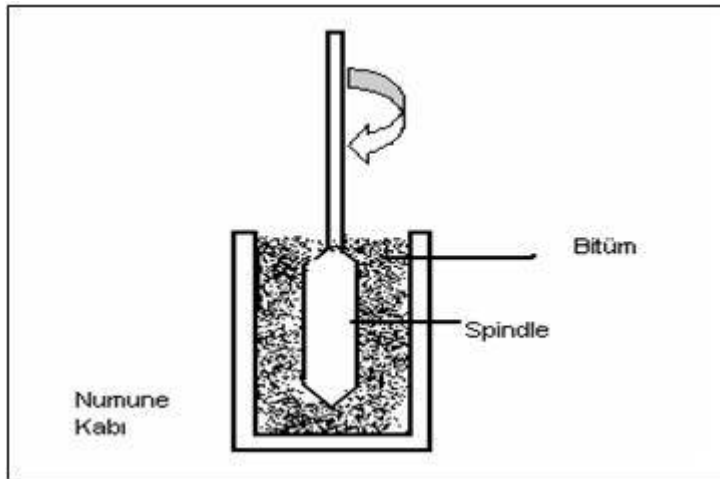
2.4.3. Dönel viskozite reometresi (Rotational Viscometer- RV)

Dönel viskozimetre bitümün yüksek sıcaklıklardaki vizkozitesi, ne derece pompalanabilirlik ve işlenebilirliğe sahip olduğunun tespiti için akış karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır [20,27].

Bu cihaz ile ölçümler bitümün içine silindirik bir çubuğun batırılıp kendi eksenini etrafında sabit bir hızda döndürülmesiyle gerçekleştirilmektedir. Çubuğun dönüş hızı numunenin kıvamına bağlıdır. Numune sertleştikçe daha düşük, yumuşadıkça ise daha yüksek dönüş hızlarının seçilmesi zorunlu olmaktadır. Çubuğun dönüş hızı dakikada 1-250 devir arasında seçilebilmektedir [7]. EK-5'te viskozite ölçümlerine ait fotoğraflar sunulmuştur.



Şekil 2.8. Dönel viskozimetrenin şematik görünümü

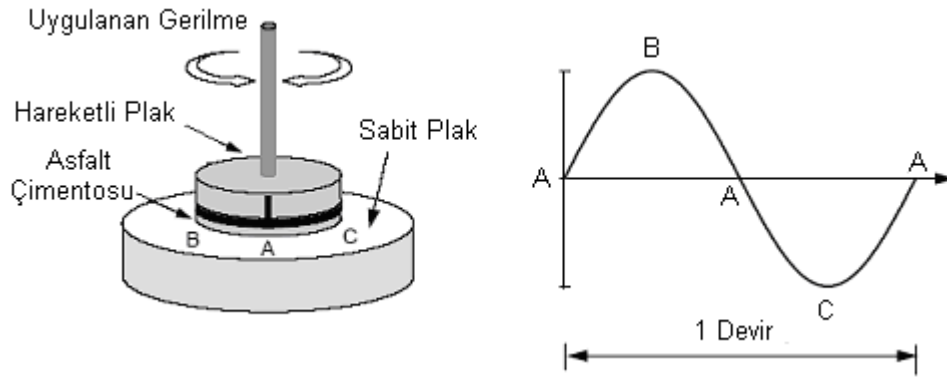


Şekil 2.9. Isıtmalı kapta deneyin işleyişi

2.4.4. Dinamik kayma reometresi (Dynamic Shear Rheometer-DSR)

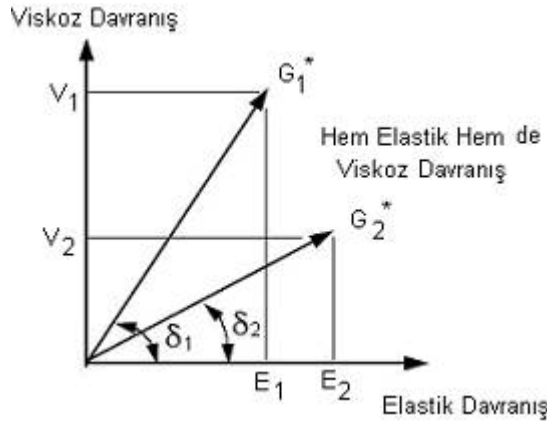
Dinamik kesme reometresi (DSR) bitümlü bağlayıcıların yüksek ve orta derece ısılarındaki kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçmek suretiyle hem viskoz hemde elastik davranışını belirlemek üzere kullanılır [28]. Dinamik

Kesme Reometresi deneyi, bağlayıcıların yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bölge iklim şartlarına göre belirlenmiş deney sıcaklıklarında bağlayıcılar sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniyedir. Deneyde ortam şartlarını yansıtmayı amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılır. Daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır [29,30].



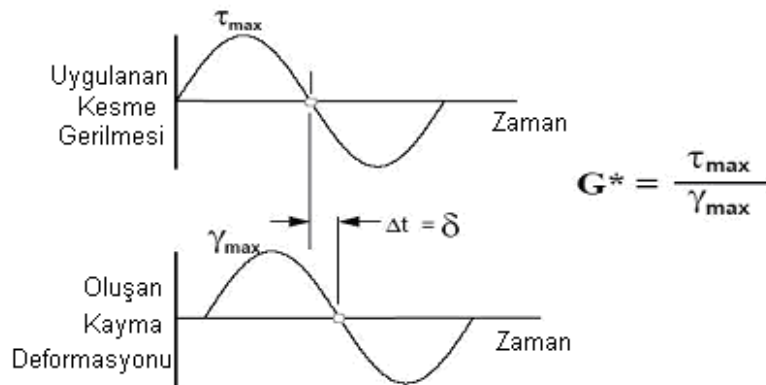
Şekil 2.10. Dinamik kayma reometre testi [29]

Dinamik kesme deneyi, bitümün kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize eder. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümün gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri bitümün sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişir [29,30].



Şekil 2.11. Bitümün viskoelastik davranışı [29]

Visko-elastik davranışı ifade eden Şekil 2.9’da görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (yüksek yükleme hızı ve düşük sıcaklık) ifade ederken dikey eksen ise viskoz davranışı (düşük yükleme hızı ve yüksek sıcaklık) ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısısı ve normal yükleme durumlarında bitüm hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Bitümün visko-elastik özelliğe sahip olması ve her bir bitümün yapısının birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı bitümlü bağlayıcıların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi visko-elastik özellik hem G^* ’a hem de δ ’a bağlıdır. Bu nedenle bitümün visko-elastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir. Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır [29,30].



Şekil 2.12. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi [29]

$$G^* = \frac{\sum \tau}{\sum \gamma} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (2.2)$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \quad (2.3)$$

T: Maksimum uygulanan tork

r: Numunenin yarıçapı

θ : Rotasyonel açı

h: Numune yüksekliği

2.4.5. Eğilme kirişi reometresi (Bending Beam Rheometer- BBR)

Asfalt bağlayıcılar düşük sıcaklıklardaki son derece rijit (katı) bir davranış gösterirler. BBR deneyi ile düşük servis sıcaklıklarında oluşabilecek termal çatlakların derecesi hakkında fikir edinmek için bağlayıcının sünme rijitliği hesaplanmaktadır [28]. Yani belirli ısıda ve sabit bir yük altında bağlayıcının ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçmekten ibarettir. Bu nedenle, bu test asfalt kaplamanın sahip olabileceği düşük ısılardaki elastik davranışını belirlemeye çalışır. Ayrıca silindir ince filim fırın ve basınç sertleşme kabı testleri ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de test yapılabildiğinden ötürü asfalt bağlayıcının zaman içindeki değişimini de saptayabilmektedir [5]. Test boyunca defleksiyon ölçülür ve rijitlik modülü tayin edilir.

$$S(t) = PL^3 / 4bh^3 \delta(t) \quad (2.4)$$

S(t): t anında sünme rijitliği (MPa)

P: Tatbik yükü

L: Kirişin yük tatbik aralığı, 102 mm

B: Kiriş genişliği, 12,5 mm

h: kiriş yüksekliği, 6,25 mm

$\delta(t)$: t anında defleksiyon (mm)

2.4.6. Doğrudan çekme cihazı (Direct Tension Tester- DTT)

Yapılan araştırmalar, asfaltın düşük sıcaklıklardaki sertliği ile kopma anından önceki uzama oranı arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Kopma anından önceki uzaması nispeten fazla olan asfaltlar sünek (düktil), fazla uzamadan kopanlar ise gevrek (kırılgan) olarak nitelendirilirler. BBR deneyi ile ölçülen sertlik, asfaltın zayıflama anından önceki çekmeye karşı kapasitesini anlatabilmekte yeterli değildir. Örneğin, bazı asfaltlar yüksek sünme sertliğine sahip olsa bile çok fazla miktarda çekilebilirler. Bu yüzden SHRP araştırmacıları, bu tür sert fakat düktil asfaltlar için bir deney geliştirmişlerdir. Bu deneyde RTFO yada PAV deneyleriyle yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Kemik formu verilmiş asfalt numunesi, düşük sıcaklıklarda iki ucundan zayıflama anına kadar çekilir. Bilgisayar tarafından hazırlanan gerilme-uzama grafiğinde gerilme eğrisinin tepe noktası uzama oranı için kritik noktadır [25-27].

2.5. Bitümün Özellikleri

Yukarıda bahsedildiği üzere bitüme uygulanan deneyler bitümün bazı özelliklerinin tayini için kullanılmaktadır. Ancak yol kaplamalarında kullanılacak bitümün sağlaması gereken bazı şartlar bulunmaktadır.

2.5.1. Bitümün rijitlik modülü

Bitümlerin yük altındaki viskoelastik davranışları rijitlik modülü ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Bitümün rijitlik modülü, uygulanan gerilme kuvveti ve bu kuvvetin oluşturduğu deformasyon miktarı ile hesaplanabilir [5].

$$S_{(t,T)} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.5)$$

Burada;

t: Yükleme süresi

T: Yüklemenin uygulandığı sıcaklık

σ : Bitüme uygulanan gerilme kuvveti

ε : Bitüme uygulanan gerilme sonunda oluşan deformasyon miktarı

Dolayısıyla rijitlik modülü, bitümlerin sahip olduğu viskoelastik ve termoplastik özelliklerini birlikte yansıtmalıdır. Bitüm yüksek ısılarda ve uzun yükleme sürelerinde viskoz sıvı davranırken düşük ısılarda ve hızlı yüklemelerde elastik bir malzeme gibi davranır. Fakat ısının ve yüklemenin ara değerlerinde ise viskoelastik davranış gösterecektir. Eğer bitümün belirli bir ısı ve yükleme hızındaki gerilme ve deformasyon bilinirse rijitlik modülü Eş. 2.5 ile tespit edilebilir.

Bitümün ısısı ve yük etki süresi arttıkça rijitlik modülü çok önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle, düşük ısılarda bilümlü kaplamaların rijitliği artarak hemen hemen hiç kalıcı deformasyon oluşmaz. Ancak yüksek ısılarda ve uzun yükleme sürelerinde (park halinde veya çok yavaş hızda hareket eden trafikte) rijitlik modülü düşük olduğundan dolayı kaplamada kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir [5].

2.5.2. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığı

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları, karışım hazırlama sırasında enerji ve süre bakımından, uygulamada ise kaplamaların yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon ve düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumu bakımından büyük önem arz etmektedir. Isı duyarlılığı düşük bağlayıcılar karışım hazırlama sırasında olumsuzluklara neden olmasına rağmen kaplama performansının artmasını sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını saptamak amacıyla yumuşama noktası ve standart penetrasyon deney sonuçları kullanılarak Penetrasyon İndeksi (PI) değeri belirlenmektedir [31].

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25}$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad \text{veya} \quad \frac{20 - PI}{10 + PI} = \frac{50 \log(P_1/P_2)}{t_1 - t_2}$$

Formüldeki P25, bitümün 25°C'deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktasını göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi'nin 2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, 2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir [31].

2.5.3. Bitümün kohezyonu

Kohezyon bir malzemenin kopmaya karşı koyan moleküller arası çekimi, içsel sürtünme veya içsel bağ olarak ifade edilmektedir. Bitümlerin kohezyon mukavemeti düşük ısıdaki duktiliteleri (sünme) ile karakterize edilmektedir [20]. Kohezyon, yükleme hızı (trafik hızı) arttıkça, bitümlü bağlayıcının viskozitesi arttıkça yada kaplamanın sıcaklığı düştükçe artmaktadır [32]. Bitümün düşük ısılardaki sünekliği kontrol edilerek kohezyon mukavemetindeki değişimi belirlenmeye çalışılarak, düşük ısılarda büzülerek gevrek davranışından dolayı oluşan düşük ısı çatlakları kontrol edilebilmektedir [20].

2.5.4. Bitümün adezyonu

Bitümün adezyon özelliği bitümün kohezyon özelliğinden farklıdır. Fakat bitümlü kaplamaların kohezyon özelliği, bitümün agregaya yapışma yeteneğine yani bitümün adezyonuna bağlıdır. Bitümün adezyonu agregaya yapışabilme yeteneği olarak adlandırılırken, bitümün kohezyonu ise yük altında aynı cins malzeme içerisinde kopmadan uzayabilme yeteneğidir [15]. Agregaya ile bitüm arasındaki bağ kuvveti arttıkça karışımın stabilitesi ve soyulma direnci artmaktadır. Soyulma, agregaya ile bitüm arasındaki bağın suyun zararlı etkileriyle kopması olarak ifade edilebilir. Agregaya-bitüm arasındaki bağ kuvveti (adezyon) arttıkça karışımında görülen soyulma

miktarı azalmaktadır [7]. Agrega, bitüm ve karışım özellikleri adezyona etki eden faktörlerdir.

2.5.5. Bitümün dayanıklılığı (Durabilitesi)

Bitümlerin dayanıklılığı sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Bitümlü bağlayıcının çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesine de “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir. Yapılan ayrıntılı çalışmalar yaşlanmanın kısa ve uzun dönem yaşlanma olmak üzere iki aşamada oluştuğunu gösterilmektedir [33]. Bitümlerin yaşlanması aşağıdaki nedenlere bağlıdır:

Oksidasyon

Bitüm havayla temasa geçtiğinde yavaşça oksitlenir. Oksitlenme sonucu bitümün moleküler ağırlığındaki artış bitümün viskozluğunun artmasına neden olarak sertleşme meydana gelmektedir [5].

Uçucu madde kaybı

Sıcaklığın artışı ve dış etkenler nedeniyle uçucu maddeler zamanla uçarak bitümün sertleşmesine neden olur.

Polimerleşme

Bu tür sertleşme, bitümün hidrokarbon zincirinin zamanla büyümesinden kaynaklanmaktadır [5].

Parçalanma

Bitümdeki yağlı maddelerin veya asfaltenin agrega tarafından porozitesine de bağlı olarak yumuşama periyotları sırasında emilmesi (absorbe edilmesi) ile bitümde sertleşme meydana gelmektedir [5].

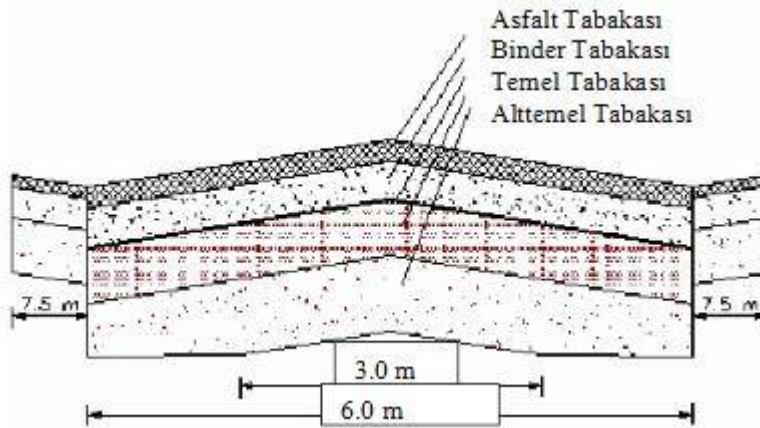
Bitümün sertleşmesinde başka nedenlerde etkilidir ama sertleşmenin çok büyük kısmı sıcak karışımın depolanma, plentte taşınma, plentte karıştırılma, şantiyeye taşınma, serilme ve sıkıştırılma işlemleri sırasında meydana gelir ve geri kalan yaşlanma ise, yolun servis ömrü boyunca oluşmaktadır[20].

3. ESNEK ÜSTYAPILAR

Bir yol üstyapısı, değişik tabakalardan oluşur. Bu tabakalar, proje ömrü boyunca emniyetli bir şekilde ve her türlü iklim koşulları altında hizmet verebilmelidir. Üstyapılar genel olarak iki temel sınıfa ayrılabilir. Bunlar esnek üst yapılar ve rijit üst yapılardır.

Esnek üstyapılar, genel olarak, düşük standartlı ve yüksek standartlı olmak üzere iki tipte inşaa edilmektedirler. Trafik hacminin düşük olduğu ve ağır taşıtların bulunmadığı veya çok az bulunduğu kesimlerde gerek yapım kolaylığı gerekse ilk yatırım maliyetinin nispeten az olmasından dolayı düşük standartlı esnek üstyapılar tercih edilmektedir. Trafik hacminin artması ve bu hacim içindeki ağır taşıt oranının belli seviyelere ulaşması durumunda ise yüksek standartlı esnek üstyapıların tercih edilmesi kaçınılmaz olmaktadır [7].

Karayolu esnek üstyapısı, trafik yükünü taşımak üzere, taban zemini üzerine yerleştirilen tabakalı yol yapısıdır. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve yükleri taban zeminine dağıtan bir üstyapı şekli olarak tarif edilmektedir. Esnek üstyapı, alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan tabakalı bir sistemdir. Yüksek standartlı esnek üstyapılara ait tipik bir enkesit Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Yüksek standartlı esnek üstyapılara ait tipik enkesit

Alttemel, temel tabakasını taşımak üzere taban zemini üzerine yerleştirilen, granülometrisi ve plastisite özellikleri belirli granüler malzemeden oluşmuş üstyapı tabakasıdır.

Temel tabakası, alttemel ve taban üzerine inşa edilen, belirli fiziksel özelliklere sahip tabakadır, kaplamayı taşımak, gerilmeleri yaymak, iyi bir drenaj temin etmek ve don etkisini azaltmak gibi fonksiyonları vardır [35]. Temel tabakası; mekanik stabilizasyon (garnüler) temel tabakası, çimento stabilizasyon temel ve plentmiks temel tabakası olarak üç farklı şekilde yapılmaktadır [5]. Bu üç tipten başka, kaplama tabakalarının hemen altında kullanılan ve agrega ve bitümün plentte karıştırılması ve yolda serilip sıkıştırılmasıyla elde edilen bitümlü temel tabakası uygulamaları da mevcuttur [7].

Kaplama tabakası aşınma ve binder olarak iki kısımdan oluşur. Bu tabakanın trafiği emniyetli ve konforlu bir şekilde geçirebilmesi için yeterli pürüzlülükte üniform bir yuvarlanma yüzeyine sahip olması gerekir.

3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Asfalt betonu, belirli bir gradasyona sahip agreganın asfalt çimentosu ile sıcak karışımından elde edilir. Asfalt betonu stabilitesini, kohezyona ve içsel sürtünmeye bağlı olarak kazanır. Kohezyon ve içsel sürtünme ise agrega gradasyonuna, karışımın sıkışma yüzdesine ve bitüm miktarına bağlıdır [36]. Asfalt betonunu, katı agrega, sıvı (asfalt) ve gaz (boşluklu) olmak üzere üç fazlı makrokollodial bir sistem olarak düşünmek mümkündür. Katı faz sisteme elastiklik verir ve kayma gerilmelerine mukavemet sağlar. Sıvı faz sistemi viskoelastik yapan faz olup kohezyonu temin eder ve gaz fazı ise karışımın bazı fiziki ve mekanik özelliklerini etkiler. Asfaltın genleşme katsayısı agreganın genleşme katsayısından yaklaşık 10 kat daha fazladır. Asfalt betonunun ısı ile genleşmesi sırasında, asfalt agregadan daha fazla genleşeceğinden dolayı, asfalt kaplamanın yüzeyine çıkacaktır. Bunu önlemek için bitümlü sıcak karışımlarda belli bir boşluk bırakılması istenir. [37].

Bitümlü malzemelerin rijitliklerine etkisinden dolayı esnek kaplamaların dizaynında sıcaklık önemli bir etkidir [38]. Agregada ve asfaltın ısıtma, tartma, eleme ve karıştırma sistemi olan plantlerde karıştırılır. Plantte karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra yola taşınır. Bu sıcak karışım kamyonlarla nakledilir, finişerlere doldurulur. Düzgün ve homojen bir yüzey verecek şekilde serici ile tabaka halinde serilir. Serimden sonra karışım henüz sıcak iken kendinden yürür uygun ağırlık ve tipteki silindirlerle düzgün ve şartnamesine uygun bir yoğunluk elde edilinceye kadar uygun bir sıcaklıkta sıkıştırılır. İyi sıkışmış bir yüzey elde edilecek şekilde sıkıştırma işlemine devam edilir [39].

Bitümlü sıcak karışımlarda elverişli agregada ve bitümlü madde seçmek ve bu karışımlarla yapılacak kaplamaları iyi kontrol etmek için bitümlü karışımların özellikleri konusunda dizayncıların ve uygulayıcıların yeterli bilgiye sahip olmaları gerekir.

Bitümlü karışımların ve bunlarla yapılan kaplamaların belli başlı özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır [39].

3.1.1. Stabilité

Stabilité; taşıtlardan gelen statik ve dinamik (hareketli) yüklerin neden olduğu kesme kuvvetlerine ve deformasyonlara karşı kaplamanın gösterdiği dayanma gücüdür. Bu Bitümlü sıcak karışımın en önemli özelliklerinden biridir. Bitümlü karışımı oluşturan agregada ve bitümün özellikleri kaplamanın, stabilité değerine ve aynı zamanda karışımın kompozisyonuna etki eder. Agregada özelliklerinin stabilité değerleri üzerindeki etkilerinin yanı sıra kullanılan bitümün cinsi veya penetrasyon derecesi kaplama üzerindeki trafiğin tipi ve hacmi ayrıca kaplamanın bulunduğu yerin iklim koşullarını göz önünde tutarak seçilmelidir.

Bitümlü madde trafiğin tipi ve hacmi itibarıyla yüksek bir stabilité istendiğinde düşük penetrasyonlu asfalt çimentosu veya bu özelliğe göre diğer bitümlü maddeler

kullanılmalıdır. Bununla birlikte soğuk kışın hüküm sürdüğü yerlerde yapılan kaplamalarda kaplamanın çatlamaya dayanıklılığı göz önüne alınmaksızın yüksek sıtabilite değerleri elde etmeye çalışılmamalıdır. Sıtabil olmayan kaplamalarda tekerlek izleri ve ondulasyonlar oluşur [5,7,39].

3.1.2. Dayanıklılık (Durabilite)

Yapılan bitümlü sıcak karışım "durabil" olmalı, hava koşullarının etkisiyle ve trafik altında sökülüp atılmamalıdır. Durabilite; Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamanın, trafik, su, hava etkilerine ve ısı değişikliklerine dayanıklılığı demektir. BSK stabil olduğu kadar durabil de olmalıdır. Durabilite, diğer bir tanımlamayla; kaplamanın aşınmaya, kabarmaya, soyulmaya ve oksidasyona dayanıklılığı anlamına gelir. Kısaca; bitümlü sıcak karışımların durabilitesi, sahip oldukları stabiliteyi hizmet ömrü boyunca devam ettirebilme yeteneği olarak tarif edilebilir. Kaplamanın aşınmaya dayanıklılığı agreganın aşınmaya olan dayanıklılığına ilişkilidir. Agregası sert ve sağlam olduğu oranda kaplama durabilitesi artar. Soyulmaya karşı dirençleri az olan agrega-bitüm karışımından oluşturulan kaplamanın durabilite ve hatta stabilite de az olacaktır. Kaplamanın oksidasyona dayanıklılığı bitümlü karışımlardaki boşluğun yüzdesi ile değişir. Oksidasyona direnci düşük olan bir kaplamanın durabilitesi de düşük olur. Oksidasyon asfalt çimentosunun penetrasyon derecesini azaltır ve sonuçta kaplama yüzeyinde çatlaklıkların oluşmasına neden olur [5,39].

3.1.3. Fleksibilite (Esneklik)

Kaplamanın altındaki çökmelere veya esnemelere çatlamadan ve kırılmadan intibak etme yeteneğidir. Kaplamanın bu özellikleri altındaki temel fleksibil (esnek) olduğu zaman önemlidir. Kaplamanın fleksibilitesine; asfaltın penetrasyon derecesi, ısındığında genişleme derecesi ve aynı zamanda bitümlü karışımdaki bitüm ve mineral fiiller miktarı da etki eder. Çok az fleksibil bir kaplama, çok az stabil bir kaplama kadar sakıncalıdır [39].

3.1.4. Rijitlik

Bitümlü sıcak karışımların rijitliği, belli bir yükleme altında oluşan deformasyon ile ilgilidir. Rijitliği yüksek olan karışımların yük uygulandığında göstereceği deformasyon miktarı, aynı şartlar altında yüklenen daha düşük rijitliğe sahip karışımlara göre daha azdır. Bitümlü sıcak karışımların rijitliği sabit olmayıp başlıca yükleme süresi ve yükleme sıcaklığından etkilenir. Yükleme süresi ve sıcaklığı arttıkça karışımın rijitliği azalmaktadır. Bitümlü karışımlarda iki farklı rijitlik mevcuttur. Bunlar, düşük sıcaklıklar ve kısa yükleme süreleri altında elastik rijitlik ve yüksek sıcaklıklar ile uzun yükleme süreleri koşullarındaki viskoz rijitliktir. Elastik rijitlik, üstyapının tasarım aşamasında kritik şekil değiştirme değerlerinin hesaplanmasında kullanılırken viskoz rijitlik malzemenin deformasyon direncinin (özellikle kalıcı deformasyona karşı) ölçülmesinde kullanılmaktadır [1,7].

3.1.5. Yorulma Mukavemeti

Yorulma mukavemeti asfalt kaplamanın tekerlek yüklerinden doğan tekrarlı gerilmelere karşı koyabilme yeteneğidir. Asfalt içeriği arttıkça yorulma mukavemeti artmaktadır. Deneyler ,yoğun gradasyonlu asfalt karışımların açık gradasyonlu asfalt karışımların göre daha yüksek yorulma mukavemetine sahip olduklarını ortaya koymaktadır [39].

3.1.6. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın serim ve sıkıştırma esasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. İşlenebilirliği düşük olan karışımlarda yeterli sıkışma sağlanmadığından karışımın stabilitesi azalıp homojen olmayan kaplamalar elde edilmektedir. Diğer bir bakışla işlenebilirlik, karışımdaki agrega danelerinin yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir [5].

3.2. Esnek Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar

Esnek üstyapılar için tasarım-imalat-malzeme kalitesi oldukça önemlidir ve üstyapının performansı bu hususlarda sağlanan yeterlilik dereceleri ile yakından ilişkilidir. Başka bir deyişle; üstyapı, hizmet vereceği şartlara göre tasarlanmalı, imalat aşamasında (plentte ve yolda) gerekli şartlar sağlanmalı ve kullanılan malzeme yeterli özelliklere sahip olmalıdır. Aksi halde hizmete açıldıktan kısa bir süre sonra trafik, iklim ve çevresel etkiler neticesinde üstyapılarda bazı bozulmalar meydana gelmektedir [7].

Esnek kaplamalarda meydana gelen bozulmalar üç gruba ayrılır. Bunlar deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlamalardır.

Deformasyon asfalt kaplama imalatından bir süre sonra görülen yapısal bozukluklardır. Bunlar kalıcı deformasyonlar (kalıcı şekil değiştirmeler) şeklinde olup yol eksen boyunca veya belirli kesimlerde yolun tüm kesitinde veya belirli kısımlarında bölgesel şekilde görülebilmektedir.

Deformasyonlar genel olarak düşük stabiliteli bitümlü sıcak karışımların imalatından kaynaklanır. Kaplama tabakalarının yetersiz sıkıştırılması, aşınma tabakalarında aşırı filler ve asfalt kullanımı, alt tabakalarda ve zeminde aşırı hacim değişikliği, tabaka kalınlıklarının yetersiz olması gibi nedenler bu bozulma tipine neden olur. Deformasyonlar genel olarak tekerlek izi, ondülasyon, bölgesel çökme, kabarma, lastik deseni gibi farklı formlarda oluşabilir [5,39].

Ayrışmalar aşınma tabakasının trafik ve iklim etkisi ile küçük parçalar halinde ayrışması sonucu kopma ve parçalanma şeklinde görülür ve aşınma tabakasından agrega tanelerinin koparak ayrılmasından kaynaklanır. Ayrışmalar yapım hataları, düşük kaliteli malzeme kullanımı, serim sırasında segregasyon, homojen olmayan karışım ve yetersiz ve yüksek penetrasyonlu asfalt kullanımından kaynaklanıp çukurlar, sökülmeler ve kaygan yüzeyler halinde görülürler [5,39].

Çatlamalar kaplama yüzeyinde çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlamalar, stabilite çatlakları, yorulma çatlakları, yansıma çatlaklar ve düşük ısı çatlakları olmak üzere farklı sebeplere bağlı olarak meydana gelebilir.

Tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar, esnek üstyapılarda görülen önemli bozulmalar arasındadır. Tekerlek izi taşıt tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde, yol boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyonlar olarak tanımlanır. Ağır taşıt sayılarındaki artış, bunların taşıma sistemlerinin değişmesi, dingil ağırlıklarının ve lastik iç basınçlarının artması gibi değişmelere bağlı nedenlerle, yollardaki bozulmalar hızla artmıştır. Tekerlek izi sürüş güvenliğini ve konforunu önemli oranda azaltır [40]. Tekerlek izi oluşumuna etki eden önemli faktörler: bitüm cinsi ve karışımdaki miktarı, agrega özellikleri, ağır taşıt trafik hacmi, kaplama üzerinde tekerlek basıncı büyüklüğü, sıcaklıktır [41].

Resim 3.1’de tekerlek izi oluşmuş bir üstyapı kesimi görülmektedir. Tekerlek izi deformasyonları özellikle hızlı taşıtlar için sürüş emniyeti açısından tehlikelidir. Ayrıca yüzeysel yağmur suları bu oluklarda birikerek taşıtların sürüş emniyetini olumsuz etkiler [5].



Resim 3.1. Esnek üstyapıda oluşan tekerlek izi bozulması

Esnek üstyapılarda görülen diğer bir önemli bozulma türü düşük sıcaklıklarda oluşan çatlamlardır. Görsel olarak Resim 3.2’de sunulan bozulma, üstyapının hizmet verdiği düşük hava sıcaklıklarında (düşük hizmet sıcaklıkları) bitümün gösterdiği davranışla yakından ilgilidir. Bu tür bozulma, kaplama yüzeyi boyunca uzanan enine çatlaklar şeklindedir. Bitümün düşük hizmet sıcaklıklarında yeterince sünek davranış sergileyebilmesi durumunda bu tür bozulmanın oluşumu azalabilmektedir [7].



Resim 3.2. Esnek üstyapılarda düşük sıcaklık sebebiyle oluşan çatlamlar

4. BİTÜM MODİFİKASYONU VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Karayolu inşaatında üstyapı maliyetleri, yolun toplam yapım maliyetleri içerisinde büyük bir paya sahiptir. Bilindiği üzere, üstyapılar, esnek, rijit ve kompozit üstyapılar olarak üç gruba ayrılır. Kaplama türleri içinde en çok kullanılan esnek üstyapılardır. Esnek üstyapı kaplama tabakalarında (aşınma, binder) kullanılan geleneksel karışım malzemeleri agrega ve bitümdür. Bitüm kaplamanın hizmet ömrü ve dış etkilere karşı direnç özellikleri açısından önemli rol üstlenir. Karışım içerisindeki ağırlıkça oranı %5 civarında olmasına karşın, maliyeti en çok etkileyen malzeme de bitümdür [11]. Dolayısıyla bitüm oranının düşürülmesi karışım maliyetlerini belirli oranlarda düşürecektir. Bitümlü bağlayıcıların özelliklerini iyileştirmek için bitüme katkı maddeleri ilave edilerek modifiye edilirler. Bitümün modifiye edilmesindeki temel amaç, kaplamaların yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olmasını sağlamaktır [1]. Performans artırıcı özellik taşıyan ve doğrudan bitüme ya da bitümlü karışımlara ilave edilen çok sayıda katkı maddesi mevcuttur. Geniş ve değişik bir ürün yelpazesine sahip olan modifiye katkı maddelerinin ortak olumsuz yönü ise bir yandan karışımın özelliklerini iyileştirirken, diğer yandan maliyeti yükseltmeleridir. Bazı endüstriyel atıklar da, depolama maliyetlerinden tasarruf amacıyla, bitümlü karışımlara ilave edilmektedir. Karışım maliyetlerini düşüren bu atıklar, karışım özellikleri üzerinde iyileştirici yönde ciddi bir etki göstermemektedirler. Bu tür atık maddelerin karışım özelliklerini olumsuz yönde etkilemesi ve bazı özelliklerini şartname sınırlarının dışına çıkarması bile söz konusu olabilmektedir [1]. Bu bağlamda; en ideal katkı maddeleri, karışıma ilave edildiğinde bağlayıcı rolü üstlenerek, kısmen bitümün yerini alan, karışımın performans özelliklerini de belirli ölçüde iyileştiren ve karışım maliyetlerini düşürebilen maddelerdir.

Katkı maddeleri bitüme karıştırılabildiği gibi doğrudan karışıma da eklenebilmektedir. Bitüme ilave edilen katkı maddeleri içerisinde en fazla polimer türü malzemeler kullanılmaktadır [42,43].

Sentetik ve doğal polimerlerden modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların başlangıcı 1843'lere dayanmaktadır. Bu konudaki deneysel projeler, Avrupa'da 1930 yılında yaygınlaşmış ve modifiye edilmiş asfaltların kullanımı ise 1970'ten sonra başlamıştır. Bu çalışmalarda başlangıç maliyeti yüksek olmasına rağmen, atık malzemelerin geri dönüşüm maliyetinin düşük olması, bu konudaki çalışmaların artmasını teşvik etmiştir [44]. Polimer ve takviyeli elyaflar 1990'ların başında ciddi anlamda kullanmaya başlanmıştır [45].

Stiren-butadien-stiren (SBS), etilen-vinil-asetat (EVA), stiren-etilen-butilen-stiren (SEBS), polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil-klorür (PVC) gibi polimerler, bitümlü sıcak karışımlarda denenmiş ve stabilite, nem hasarına karşı dayanım, yorulma dayanımı gibi birçok parametreyi olumlu yönde etkiledikleri belirlenmiştir [44,46].

Modifiye edilmiş asfaltlarda kullanılan polimerler 3 sınıfa ayrılır. Bunlar; termoplastik elastomerler, plastomerler ve reaktif polimerlerdir. Termoplastik elastomerler eklendiği zaman bağlayıcının, elastik özelliği artmakta ve daha esnek olmaktadır. Ancak plastomer eklendiğinde bağlayıcının sertlik özelliği artar ve ağır yük altında daha dayanıklı hale gelir[47,48]. Bununla beraber plastomerler bitümün sertlik ve viskozitesini normal hava sıcaklığında arttırır. Sıcaklıktaki ani değişiklik elastikiyet indeksinin artması için yeterli değildir. Bitümlü karışımında kullanılan bazı plastomer polimerler, etilen-bütül akrilat (EBA), kopolimerler ve polietilendir (PE) [47,48].

Evsel ve sanayi atıklarındaki plastikler, esnek kaplamalar için ham madde kaynağıdır. Atık plastikler genellikle paketlenmede kullanılan polietilen, polipropilen ve poliestiren gibi malzemelerden oluşmaktadır. Bunların yumuşama noktası 110°C ile 140°C arasında olup, yumuşama esasında hiçbir zehirli gaz üretmezler [49].

4.1. Literatür Araştırması

Esmaeil Ahmadiania, Majid Zargar, Mohamed Rehan Karim, Maherz Abdelaziz ve Payam Shafigh, atık plastik şişelerin, taş mastik asfalt (SMA) karışımının mühendislik özellikleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, değişik oranlarda (0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%) ve 1,18mm boyutunda polietilen tereftalat (pet) içeren bitümlü karışımların hacimsel ve mekanik özelliklerini hesaplamışlar ve laboratuvar testleri ile değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, PET oranı bitümün kütlece %6 değerine kadar Marshall stabilitesinde önemli bir artış olurken, PET oranının artmasıyla stabilite değeri düşmüştür. Marshall akma değeri ise başlangıçta düşük iken PET oranının artmasıyla bu değer artmıştır. MQ değerinin yüksek çıkması, PET'in ilavesiyle karışımın rijitlik değerinin arttığını ve kalıcı deformasyonlara karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. PET'in eklenmesiyle karışımdaki hava boşluğu(VIM) artmış ve karışımın özgül ağırlığı azalmıştır. Karışımın stabilitesine ve MQ değerine bakarak, PET'in optimum miktarının bitümün kütlece %6'sı olduğunu belirlemişlerdir. Yapılan çalışma, sanayideki atık malzemelerin tekrar kullanılmasını teşvik ederek hem yol inşaatındaki maliyetin azalmasına hem de çevre problemlerin çözülmesine katkı sağlamıştır [50].

Taher Baghaee Moghaddam, Mohamed Rehan Karim ve Tamalkhani Syammaun, taş mastik asfalt(SMA) karışımının rijitlik ve yorulma özelliğini belirlemek için, optimum asfalt içeriğinde max 2.36mm boyutunda atık PET'i farklı oranlarda kullanmışlardır. Çalışmada indirekt çekme rijitlik modülü ve indirekt çekme yorulma testlerini 20 °C ve 3 farklı basınç değerinde (250, 350, 450 kpa) yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, SMA'ya bitümün kütlece %1'i oranında PET ilave edildiğinde karışımın rijitliği artarken, bu oranın artmasıyla karışımın rijitliği azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca PET'in eklenmesiyle SMA karışımının yorulma mukavemeti artmış olup, karışımın yorulma mukavemeti PET oranının artmasıyla artmıştır. Karışımın elastik özelliği, PET'in eklenmesiyle iyileştirilmiş ve karışım daha esnek hale geldiği için çatlak oluşumuna engel olduğu tespit edilmiştir [51].

Awwad ve Shbeeb bitümlü karışımların özelliklerini iyileştirmek için polietilen gibi polimerleri kullanmışlardır. Çalışmalarında en iyi ürünü ve oranını belirlemek için yüksek ve düşük yoğunluklu polietilenleri, öğütülmüş ve öğütülmemiş olarak karışıma eklemişler ve öğütülmüş yüksek yoğunluklu polietilenlerin daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. En iyi sonucu veren modifiyerin karışım içindeki miktarı, bitümün kütlece %12'si olarak belirlemişlerdir. Awwad ve shbeeb yaptıkları çalışmada, polietilen polimerinin karışıma eklenmesiyle, stabilitenin arttığını, ağırlıklar arasındaki boşluğun az miktarda arttığını ve bitümlü karışımın yoğunluğunun düştüğünü gözlemlemişlerdir [52].

Deniz Arslan, Metin Gürü ve Kürşat Çubuk yaptıkları çalışmada yeni sentezlenen organik esaslı magnezyum bileşiği (OBMAGC), organik esaslı mangan bileşiği (OBMANC) ve organik esaslı çinko bileşiğini (OBZC) asfalt modifiyeri olarak kullanmışlardır. 50/70 penetrasyon dereceli asfaltı, bu katkı maddeleri ile ağırlıkça %1'den %10'a kadar değişen oranlarda ayrı ayrı modifiye etmişlerdir. Modifikasyonun asfalt ve sıcak asfalt karışım özellikleri üzerindeki etkisini konvansiyonel testler (yumuşama noktası testi, düktilite testi, Marshall Stabilitate testi, Nicholson soyulma testi ve indirekt çekme testi) ve Superpave metodlarıyla (dönel viskozite, eğilme kırışı reometresi, dinamik kayma reometresi) araştırmışlardır. Asfalt modifikasyonunda kullanılacak OBMAGC, OBMANC ve OBZC için uygun konsantrasyon dönel viskozite test sonuçlarına dayanarak %3 olarak belirlemişlerdir. Sıcak asfalt karışımların stabilitesi ve soyulma direncinin yanı sıra asfaltın düşük sıcaklık performansının her bir katkı maddesi ile iyileştiği tespit etmişlerdir [53].

Deniz Arslan, Metin Gürü ve Kürşat Çubuk tarafından yapılan diğer bir çalışmada bitümün, organik esaslı kalsiyum bileşiği (OBCC) ve organik esaslı borik asit bileşiği (OBBAC) olmak üzere iki yeni katkı maddesi ile ayrı ayrı modifikasyon araştırılmıştır. Bu bileşikler laboratuvar koşullarında kimyasal olarak sentezlenmiştir. 50/70 penetrasyon dereceli bitüm OBCC ve OBBAC ile ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 konsantrasyonlarında modifiye edilmiştir. Katkı maddelerinin bitüm ve bitümlü karışım özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek

üzere geleneksel (Yumuşama Noktası, Düktilite, Marshall, Nicholson Soyulma, İndirekt Çekme) ve Superpave test metotları (Dönel Viskozite, Eğilme Kirişi Reometresi (BBR), Dinamik Kayma Reometresi (DSR)) uygulamışlardır. Her bir katkı maddesinin uygun konsantrasyon oranı dönel viskozite test sonuçları temelinde ağırlıkça %3 olarak belirlemişlerdir. OBCC ve OBBAC ile viskozite ve yumuşama noktasının azaldığını, düktilitenin arttığını, ayrıca DSR test sonuçlarına göre modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performansı orijinal bitüm ile aynı seviyeyi sağladığını ve BBR test sonuçlarına göre OBCC ve OBBAC modifikasyonları ile daha iyi düşük sıcaklık çatlama direnci elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Bitümlü karışımların Marshall Stabilitesi, soyulma direnci ve rijitlik modülünün her iki katkı maddesi ile iyileştiği tespit edilmiştir [54].

Meltem Çubuk, Metin Gürü ve Kürşat Çubuk tarafından yapılan çalışmada termoplastik polimerlerden ticari adıyla teflon olarak bilinen politetrafloretilen (PTFE) bitüme ilave ederek bitümün modifikasyonu ve katkı maddesinin bitümün reolojik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bitümün reolojik özelliklerini belirleyebilmek için orijinal ve modifiye edilmiş bitüme geleneksel (Yumuşama Noktası, Penetrasyon) ve Superpave test metotları (Dönel Viskozite, Döner İnce Film Etüvü (RTFOT), Basınç Sertleşme Kabı (PAV), Eğilme Kirişi Reometresi (BBR), Dinamik Kayma Reometresi (DSR)) testleri ve performanslarına ilişkin ise Marshall stabilite ve soyulma deneyleri uygulamışlardır. Katkının bitümün camsı geçiş sıcaklığına etkisi fark taramalı kalorimetre (DSC) ve yüzey enerjisine etkisi ise diferansiyel yüzey analizi (DSA) ile tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda bitümün viskozite değerinin arttığı, yumuşama noktasının azaldığı ve soyulma oranı %5 civarında daha düşük direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Üstelik katkı maddesinin eklenmesiyle, bitümün tekerlek izi oluşumunun %54 oranında ve karıştırma prosesi sonrası yaşlanmış bitümün tekerlek izi oluşumunun yaklaşık %29 oranında azalmıştır [55].

Deniz Arslan, Metin Gürü ve Kürşat Çubuk tarafından yapılan çalışmada 50/70 penetrasyon dereceli bitümün modifikasyonu, organik esaslı sentetik çinko fosfat

bileşiğı (OEÇFB) ile araştırılmıştır. OEÇFB, çalışma kapsamında sentezlenmiş yeni bir katkı malzemesi olup ve bitüm modifiyeri olarak daha önce kullanılmamıştır. OEÇFB'nin bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkisi konvansiyonel (yumuşama noktası testi, düktilite testi, Marshall testi, Nicholson soyulma testi) ve superpave (dönel viskozite, eğilme kirişi reometresi, dinamik kayma reometresi) test metotları ile incelemiştir. OEÇFB, bitüme kütlece %1, %2, %3, %5, %10 oranlarında ilave edilip viskozite test sonuçları değerlendirilerek bitüm modifikasyonunda kullanılacak OEÇFB konsantrasyonu %3 olarak gözlemlemişlerdir. Bitümün düşük sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin iyileştiğini, bitümlü karışımların Marshall stabilitesinde %6,1 ve soyulma direncinin %30'dan %95'e arttığını tespit etmişlerdir [56].

Deniz Arslan, Metin Gürü ve Kürşat Çubuk tarafından yapılan diğer bir çalışmada bitümün trietilen glikol esaslı polibor (TEGPB) ile modifikasyonu araştırılmıştır. TEGPB laboratuvar koşullarında sentezlenmiş yeni bir katkı maddesi elde edilmiştir. 50/70 penetrasyon dereceli bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 ve %5 oranlarında ekleyip modifikasyonunun bitüm ve bitümlü karışım özellikleri üzerindeki etkileri yumuşama noktası, Marshall stabilite, Nicholson soyulma, dönel viskozite (RV), Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Eğilme Kirişi Reometresi (BBR) testleri ile belirlenmiştir. Bitüm içerisinde kullanılacak TEGPB miktarı RV test sonuçlarına göre ağırlıkça %2 olarak seçilmiştir. BBR ve Nicholson test sonuçları modifiye bitümün sünme özelliklerinin ve soyulma direncinin olumsuz etkilenmediğini ve bitümlü karışımların Marshall stabilitesinin yanı sıra bitümün yumuşama noktası ve tekerlek izi direncinin TEGPB ile arttığını tespit etmişlerdir [57].

Al-Hadidy ve Yi-qiu yaptıkları çalışmada, düşük yoğunluklu polietileni piroliz ederek bitümlü karışımı modifiye etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, yumuşama noktasının arttığını ve düktilite değerinin +100 cm olduğunu ayrıca orijinal asfaltın durabilitesinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca düşük yoğunluklu polietilenin bitümlü sıcak karışımlara eklenmesiyle, karışımın farklı iklim ve çevre koşullarına,

yüksek ve düşük sıcaklıklara ve aşırı yağışa karşı dayanaklı olduğunu tespit etmişlerdir [48].

Al-Hadidy ve Tan, taş mastik karışımlarında (SMA) katkı maddesi olarak nişasta (ST) ve SBS'nin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bitümün kütlece %5 oranında ST ve SBS, 70/100 penetrasyon dereceli bitüm ile karıştırmışlardır. SBS ile modifikasyon işlemi 170°C'de 2 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. ST ile modifikasyonda en iyi sonuçların karıştırma sıcaklığı 135°C ile 142°C'nin üzerindeyken elde edildiği gözlemlenmiştir. Orijinal ve modifiye bitümler fizikokimyasal testlere tabii tutulmuştur. Orijinal ve modifiye SMA karışımlarına Marshall stabilitesi, çekme dayanımı, çekme dayanımı oranı ve esneklik modülünü içeren performans testleri uygulanmıştır. ST ve SBS eklenmesiyle Marshall stabilitesinde, çekme dayanımı oranında ve esneklik modülünde artış meydana gelmiştir. Sonuçlara göre, bitüme ST veya SBS eklenmesiyle su (rutubet) hasarının ve sıcaklık hassasiyetinin azaltılabileceği tespit edilmiştir [58].

Sinan Hınıslioğlu ve Emine Ağar, yüksek yoğunluklu polietilen içeren farklı atık plastik malzemeleri ile modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Modifikasyon işlemleri farklı karıştırma süresi, sıcaklık ve farklı oranlarda yapılarak etkileri incelenmiştir. Marshall stabilite, akma ve Marshall quotient 'i incelenmiş ve yüksek yoğunluklu polietilenin optimum oranı %4, karıştırma sıcaklığı 165 °C ve süresi 30 dakika olarak tespit edilmiştir [59].

Zoorob ve Suparma, esas olarak düşük yoğunluklu polietilen (LPDE) ve polipropilen içeren geri dönüştürülmüş atık plastikleri, bitümlü karışıma ekleyerek, karışımın stabilitesinde önemli oranda (orijinal karışımın yaklaşık 2.5 katı) artış gözlemlenmişler ve durabilitesinin azaldığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, modifiye edilmiş karışımın yorulma mukavimetinin saf karışıma göre arttığını belirlemişlerdir [60].

Osmau ve Masaru atık plastik malzemeler, polietilen ve polipropileni bir miktar agregaya ekleyerek bitümlü karışımlardaki uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, bitümlü karışımlara polietilen ve polipropilenin eklenmesiyle, bitümlü karışımların soyulmaya karşı ve yorulmadan kaynaklanan bozulmaya karşı dayanaklılığında belirgin bir artış olduğu sonucuna varmışlardır [61].

Yüksel Taşdemir, bitümlü karışımlarda polietilen mumu kullandığında karışımın, tekerlek izine karşı dayanaklı olduğunu tespit etmiştir [62].

Zahra Niloofar Kalantar, Mohamed Rehan Karim ve Abdelaziz Mahrez, saf ve atık polimerlerin bitümlü karışımlarda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Sonuç olarak, kaplamanın performansı ve ömrü, saf polimerler içeren karışımlar kullandığında arttığı gibi atık polimerler içeren karışımların kullanılmasıyla da kaplamanın performansı iyileşmiştir. Dolayısıyla yol inşaatında atık polimerlerin kullanılması, ekonomik yönden tasarruf sağlayarak çevreye verilen zararın azalmasına da katkıda bulunmaktadır [63].

Vasudevan, Ramalinga Chandra Sekar, Sundarakannan ve Velkennedy, yaptıkları çalışmada yumuşatılmış plastikleri, 160 °C'deki sıcak agregaların üzerine püskürtüp ince bir tabaka halinde agregaların üzerini sarmışlardır. Polimer ile kaplanmış agregalar (PCA), farklı oranlardaki sıcak bitümle karıştırılıp, yol inşaatında kullanmışlardır. Sonuç olarak, polimer katkısıyla bitümlü karışımların yapışkanlık özelliğinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bitümlü karışımın stabilitesi ve yolun yük taşıma kapasitesi yüksek bir artış göstermiştir. Ayrıca yapılan yolda hiçbir çöküntü ya da çukur oluşmamıştır. Bu çalışma kuru metod yöntemiyle, yüksek oranda atık plastiklerin kullanılmasını, bitüm ihtiyacının %10 oranında azalmasını, yolun performans ve dayanaklılığının artmasını, soyulma direncinin artmasını ve çevre kirliliğinin önüne geçilmesini sağlamıştır [64].

Nadkarni, Shenoy ve Mathew, yaptıkları çalışmada maleik anhidrid ve stiren-bütadien-stiren (SBS) kauçuğu, bitüme ekleyerek, bitümün termomekanik

özelliklerini viskozite ve yumuşama noktası testlerine bakarak incelemişlerdir. Çalışmada bitümün kütlece %5 SBS kauçuğu ve %10 maleik anhidridi bitüme eklemişlerdir. Sonuçlar göstermiştir ki maleik anhidrid ile yapılan kimyasal modifikasyon düşük sıcaklık kırılma direncini ve yüksek sıcaklıkta yapışma kuvvetini geliştirmiştir. Kimyasal modifiye edicilerin asfaltların düşük ve yüksek sıcaklıktaki performanslarını artırıcı özelliklere sahip olduğu gözlenmiş ve ortaya konulmuştur [65].

Geçkil, Alataş ve Ahmedzade, siyah karbonunu (SK) bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık altında tekerlek izine karşı dayanımına etkisinin araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada 160/220 penetrasyon dereceli bitüme siyah karbonu, bitümün kütlece %5, %10 ve %15 oranında ekleyip ve geleneksel ve superpave deneylerini uygulamışlardır. Modifiye bağlayıcılarda, katkısız bağlayıcılara göre düktilite ve penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama ve parlama noktalarında ise artış meydana gelmiştir. Bu durum, SK ilavesiyle bağlayıcıların sertliğinin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin düştüğünü göstermiştir. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney sonuçlarına göre; katkısız bitümlere göre SK katkılı modifiye bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerlerinin, SK oranının artışıyla (özellikle %10 ve %15 SK) önemli ölçüde yükseldiği tespit edilmiştir. Bu yükselme, bitümün sertleştirdiğini ve dolayısıyla deformasyonlara karşı direncinin arttırdığını göstermiştir. SK ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların faz açısı değerlerinin düşük olması, bu tür bağlayıcıların saf bitüme göre daha fazla elastik ögeye sahip olduğunu, bu nedenle daha fazla deformasyonun geriye dönmesine olanak sağladığını göstermektedir. DSR deneyleri sonucunda, SK katkılı bağlayıcıların tekerlek izi parametresi, katkısız bitüme göre daha yüksek çıkmış, dolayısıyla bitümün tekerlek izi dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Saf 160/220 penetrasyon dereceli bitüm Superpave tekerlek izi şartını 59°C sıcaklıkta sağlarken artan SK oranıyla bu sıcaklık 73°C' ye kadar çıkmıştır. Ancak %15 SK katkılı bağlayıcısı RTFOT kütle kaybı bakımından uygun olmadığından bu durumda en elverişli karışımın %10 SK katkılı karışım olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bitüm modifikasyonunda SK kullanılması durumunda, özellikle yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde karışımların

elastiklik özelliğinin ve tekerlek izine karşı dayanımının artacağı, kaplamada yaptığı iyileştirmelerle kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı bakım-onarım masraflarını, gösterdiği iyi performansla çok daha aza indireceği önermişlerdir [66].

Ahmedzade ve Yılmaz, Stiren-Butadien-Stiren (SBS) modifikasyonunun bitümlü bağlayıcıların ısı duyarlılığı, rijitlik ve yaşlanma özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada saf ve modifiye bağlayıcılar Dönel Ince Film Halinde Isıtma Deney (RTFOT) yöntemiyle yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işleminden önce ve sonra bağlayıcılara standart bağlayıcı deneyleri (penetrasyon ve yumuşama noktası) uygulanmıştır. B 50/70 penetrasyon seviyesinde bir bağlayıcı, B 70/100 ve B 100/150 ana bağlayıcılarına %3.0, B 160/220 ana bağlayıcısında ise %6.0 SBS kullanılması ile sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan modifikasyondaki SBS oranı arttıkça bağlayıcı rijitliklerinin arttığı, ısıya karşı duyarlılığın ve yaşlanma etkisinin azaldığı belirlenmiştir [67].

Moghadas Nejad, Aghajani, Modarres ve Firoozfar, bitüme kırıntı formu kauçuk ilave etmişlerdir ve modifiye edilmiş bitümün özelliklerini belirlemek için geleneksel ve Superpave testlerini uygulamışlardır. Çalışmalarında modifiye edilmiş bitümün, penetrasyon, ısıya duyarlılık, düktilite ve frass kırılma noktasının azalmasını ve yumuşama noktası, esnek geri dönüşüm ve vialit adezyonun artmasını tespit etmişlerdir. Ayrıca dinamik kayma reometresi ve sünme testinin sonuçlarına bakarak, yüksek sıcaklık ve düşük frekanslarda, kauçukların artmasıyla çekim ya dönüşüm noktası ve aralığının artmasını ve düşük sıcaklık ve yüksek frekanslarda parametrelerin azalmasını gözlemlemişlerdir. Üstelik kauçuk miktarının artması ve bitümün silindir ince film fırınında (RTFO) yaşlandırılması, sünme miktarının azalmasını ve viskozitenin artmasını sağlamıştır [68].

5. MATERİYAL VE METOT

Karayolu ulaşımını sağlamak, bunun yanı sıra konforlu ve bozulmalara karşı daha dirençli bir üstyapı üretmek, uygun kalitedeki malzeme ile belirli tasarım ve yapım şartları gerektirmektedir. Türkiye’de otoyolların tamamında ve trafik hacminin yoğun olduğu devlet yollarında yüksek standartlı esnek üstyapılar, sahip oldukları özellikler ve sağladıkları imalat ve kullanım avantajlarına bağlı olarak inşa edilmektedir. Ancak belirtilen hususlarda yeterli hassasiyet sağlansa dahi bu üstyapı türünde bazı bozulmaların oluşumu engellenememektedir. Bunlar arasında tekerlek izleri ve düşük hava sıcaklıklarında oluşan çatlaklar oldukça önemli bozulmalardır.

5.1. Malzeme

Çalışmada Kırıkkale rafinesinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Çalışma kapsamındaki tüm modifikasyon uygulamalarında aynı bitüm kullanılmıştır.

Bitümlü karışımlar bazalt türü agrega kullanılarak hazırlanmıştır. Agregası, kızılca hamam ocağından temin edilmiştir.

Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan bazalt türü agreganın kimyasal özellikleri

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CO ₂	Cl	SO ₄
1,6	0,85	0,57	0,03	21,5	29,67	0,1	0,25	45,45	0,006	0,002

5.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddesi

Çalışmada kullanılan katkı maddelerin temel malzemesi Polietilen tereftalat (PET) şişelerdir. Genel bir bakışla PET, tereftalik asit ile etilen glikolün doymuş polimer

esteridir. Son yirmi yılda kullanımının yaygınlaşması göz önüne alındığında PET'ler önemli mühendislik polimerlerden birisi olarak düşünülebilir. PET şişeleri yüksek dayanımlı, hafif olmaları ve düşük gaz geçirgenliklerinin yanı sıra estetik görünümlü, iyi ışık geçirgenliği ve düzgün yüzeyleri olabilen bir malzeme olarak tanımlanabilir. PET'lerin başta gıda ambalajlanması olmak üzere geniş bir alanda kullanılmasının bir sebebi de insan sağlığına doğrudan bir yan etki göstermemesidir. PET, birincil derecede çevreye zehirli bir etki göstermemekle beraber hızlı bir şekilde atığa dönüşüm oranı ve atmosferik şartlar ile biyolojik maddelere dayanaklı olması, doğada kendiliğinden yok olmaması, PET'in cam, kağıt veya metal gibi geleneksel malzemelerde olduğu gibi ekonomik ve ekolojik olarak değerlendirme zorunluluğu ortaya koymaktadır [69].

1987 yılında Plastik Endüstri Birliği tarafından plastikleri tanımlayıcı kodlar geliştirilmiştir. PET'leri tanımlama kodu 1'dir. Yoğunluğu $1.33-1.38 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Orta sertlik en çok kullanılan plastiklerden biridir. PET, açık veya hafif renkli, yarı saydam ve 250°C gibi yüksek erime sıcaklığı olan bir plastiktir. PET hızlı yanar, alevleri renksizdir. Yanarken mum kokusu ve sönerken beyaz duman vermektedir [70].

Katkı maddesi atık PET şişelerden kompozit malzeme elde etmek için önce farklı glikollerle glikoz işlemi uygulanmıştır. Atık PET şişeler küçük parçalara ayrılarak PVC, PE gibi yabancı malzemelerden arındırılarak flakeler sabunlu su ile yıkanıp kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutulan flakeler etilen glikol (EG), di etilen glikol (DEG), propilen glikol (PG), di propilen glikol (DPG) ve bütıl glikol (BG) ile glikoliz işlemine tabi tutulmuştur. Bu esnada Titan IV Bütoksit (TBT- Aldrich %97) katalizör olarak kullanılmıştır. Bu glikoliz ürünlerinin asit sayıları (AS) ve hidroksil sayıları (OH sayısı) ölçülmüştür. Daha sonra farklı metot ve işlemler uygulayarak katkı maddesi elde edilmiştir. [69]. EK-6'da katkı maddelerine ait fotoğraflar sunulmuştur.

5.3. Metot

PET şişelerinden elde edilen sıvı ve katı haldeki katkı maddelerinin, bitüm ve bitümlü karışımlarda etkisini incelenmek amacıyla yapılacak deneyleri 3 ana gruba ayrılmıştır.

1. Katkı maddeleri ile modifiye bitümlerin hazırlanması
2. Orijinal ve modifiye bitümlere uygulanan deneyler (viskozite, yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite, DSR, BBR)
3. Orijinal ve modifiye bitümle imal edilen bitümlü karışımlara uygulanan deneyler (Marshall stabilite ve Nicholson soyulma).

katkı maddelerinin bitümün reolojisi üzerine etkileri ise viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, DSR, BBR deneyi ile belirlenmiştir. Orijinal ve modifiye edilmiş bitümün agrega ile karıştırılarak oluşturulan sıkıştırılmamış karışımlara Nicholson soyulma deneyi uygulanarak adezyon performansları incelenmiştir. Ayrıca, orijinal ve modifiye edilmiş bitümler ile Marshall yöntemiyle hazırlanan karışımların stabiliteleri belirlenmiştir.

5.4. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

Çalışmada katkı maddeler, 120 °C sıcaklık ve 10 dakika karıştırma süresi ile bitüme eklenip modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada uygulanan sıcaklık ve süre, farklı sıcaklık ve karıştırma sürelerinde numune hazırlayıp viskozite deneyine tabi tutulduktan sonra belirlenmiştir.

Uygun sıcaklık ve süreyi bulduktan sonra katkı maddeleri bitüm ağırlığının %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında ilave edilmiştir. Her iki katkı maddesi ile bitüm modifikasyonu aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir.

- Orijinal bitüm metal kap içerisinde 120 °C'ye ısıtıldı.
- Yeterli miktarda katkı maddesi (sıvı ya katı) bitüme ilave edildi.

- Katkı maddesi ile bitüm 120°C'deki yağ banyosunda 1300 devir/dakika hızla çalışan çift kollu mekanik karıştırıcı ile 10 dakika karıştırıldı.
- Hazırlanan modifiye bitüm oda sıcaklığında soğutulduktan sonra metal kabın ağzı kapatıldı.

Modifiye bitümler her bir deney için ayrı ayrı hazırlanmıştır. Modifiye bitüm imal edildikten 24 saat sonra deneysel uygulamalara tabi tutulmuştur. 24 saatlik süre, modifikasyon sonrasındaki kür süresi olarak belirlenmiştir.

5.5. Bitüm ve Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deneyler

Çalışmada bölüm 2.2 ve 2.4'te anlatıldığı üzere orijinal ve modifiye edilmiş bitüme penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, soyulma, viskozite, DSR ve BBR uygulanmıştır. Bitümlü karışımlarda ise Marshall deneyi yapılmıştır.

5.5.1. Marshall deneyi uygulamaları

Çalışmada agrega gradasyonu olarak Karayolları Yeni Fenni Şartnamesinde Tip 1 adı altında verilen gradasyonun ortalama değerleri kullanılmıştır. Tip 1, yüksek standartlı esnek üstyapıların en üstünde bulunan aşınma tabakasında kullanılmak üzere belirlenmiş bir gradasyon tipidir. Tip 1'ye ait gradasyon değerleri ve çalışmada agrega gradasyonu olarak kullanılan Tip 1 şartname ortalama değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Tip 1 gradasyon dağılımı ve tasarımda kullanılan şartname değerleri

Elekten Geçen Malzeme Miktarı		
Elek Boyutu	Tip 1 Gradasyon Değerleri	Tip 1 Şartname Ortalama Değerleri
19 mm (3/4")	100	100
12.5 mm (1/2")	83-100	91,5
9.5 mm (3/8")	70-90	80
4.75 mm (#4)	40-55	47,5
2.00 mm (#10)	25-38	31,5
0.425 mm (#40)	10-20	15
0.180 mm (#80)	6-15	10,5
0.075 mm (#200)	4-10	7

Her bir briket, Çizelge 5.2’de “Tip 1 şartname ortalama değerleri” adı altında verilen gradasyon özelliğine sahip bazalt türü agregadan 1150 gr kullanılarak hazırlanmıştır. 4 numaralı elek üzerinde kalan agregaya kaba agrega, 4 ile 200 no’lu elekler arasında kalan agregaya da ince agrega ve 200 numaralı elekten geçen agregaya filler denilmektedir. Buna göre Marshall testinde kullanılan her bir briket 603,75 gr kaba agrega, 465,75 gr ince agrega ve 80,5 gr filler içerecek şekilde hazırlanmıştır.

Marshall tasarımında %4, %4,5, %5 ve %5,5 oranlarında bitüm içeriklerinde ve her bir bitüm içeriğinde toplam 3 adet briket hazırlanarak yapılmıştır.

Analiz ve deney sonuçlarına bağlı olarak; Bitüm Oranı – Pratik Özgül Ağırlık (Dp), Bitüm Oranı – Stabilite, Bitüm Oranı – Akma, Bitüm Oranı – Bitümle Dolu Boşluk Oranı (Vf), Bitüm Oranı – Boşluk Oranı (Vh), Bitüm Oranı – Agregalar Arası Boşluk (VMA) Oranı ilişkilerini veren grafikler çizilmiştir. Daha sonra bitüm oranı - Dp, stabilite, Vh ve Vf grafiklerinden elde edilen bitüm oranı ortalamasından karışımın optimum bitüm oranı hesaplanmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar ve bunlara göre katkı maddelerinin orijinal bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerinde gösterdiği değişimler değerlendirilmiştir.

6.1. Viskozite Test Sonuçları

Katkı maddelerinin bitümün viskozite üzerindeki etkisi sıcaklığa bağlı olarak ölçülmüştür. Viskozite testleri, orijinal ve modifiye edilmiş bitümlere ASTM D4402-87 (Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus) şartlarına uygun olarak uygulanmıştır. Bu ölçümler 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C ve 160°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Elde edilen sonuçları değerlendirerek katkı maddenin optimum miktarı ve modifiye edilmiş bitümün hangi şartlarda kullanılabilirliği üzerinde çalışılmıştır.

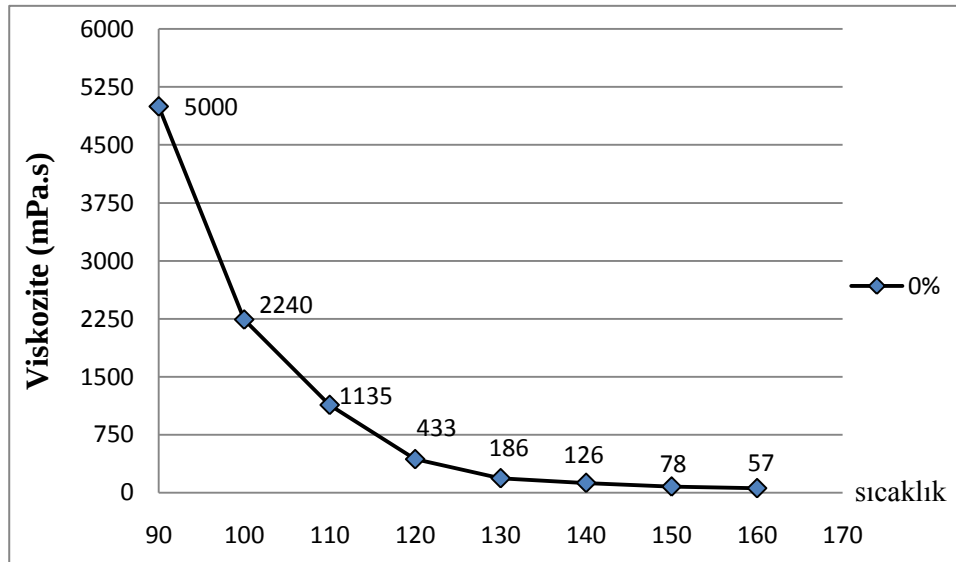
6.1.1. Orijinal bitümün viskozite test sonuçları

50/70 penetrasyon dereceli orijinal bitümün viskozite değerleri 90°C – 160°C aralığında toplam 8 farklı sıcaklıkta ölçülmüştür. Sonuçlar çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	5000	5013	5000	4993	5007	5000
100	2247	2240	2247	2240	2253	2240
110	1120	1127	1133	1133	1140	1135
120	413	426,7	433,3	433,3	420	433
130	186,7	193,3	186,7	186,7	193,3	186
140	120	126,7	133,3	126,7	140	126
150	73,3	80	86,7	80	93,3	78
160	53,3	60	60	53,3	66,7	57

Çizelge 6.1’de Görüldüğü üzere her bir sıcaklıkta beş ölçüm mPa.s (miliPaskal*Saniye) cinsinden yapılmıştır. Her bir sıcaklıkta viskozite değeri yapılan ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.



Şekil 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla viskozite değeri azalmıştır. Sıcaklık arttıkça viskozitedeki azalma azalmaktadır. Sıcaklık 90°C’den 100°C’ye

yükseldiğinde viskozite %55.2 oranında azalırken 150°C’den 160°C’ye yükseldiğinde %26.9 oranında azalmıştır.

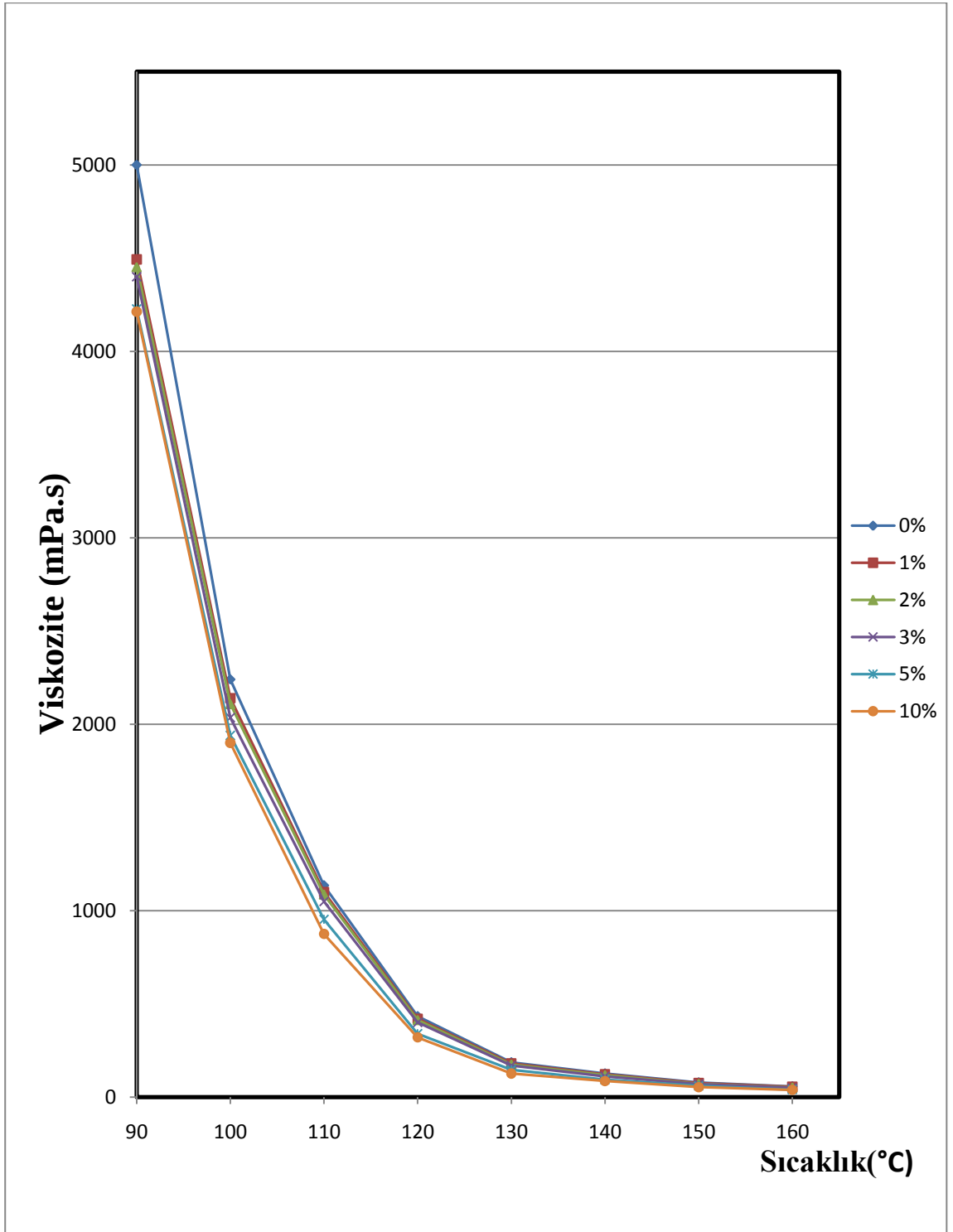
6.1.2. İnce Akışkan Polipl (İAP) ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Çalışmada bitüme kütlece %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında ince akışkan poliol (İAP) ekleyerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Her modifiye edilmiş bitümün viskozitesi 90°C ile 160°C arasında toplam 8 farklı sıcaklıkta ölçülmüştür. Her sıcaklıkta en az beş ölçüm yapılmıştır ve viskozite değeri ölçümlerin ortalamasından elde edilmiştir. Çizelge 6.2’de orijinal ve İAP katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. Viskozite sonuçları detaylı olarak Ek-10’da sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Orijinal ve İAP katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

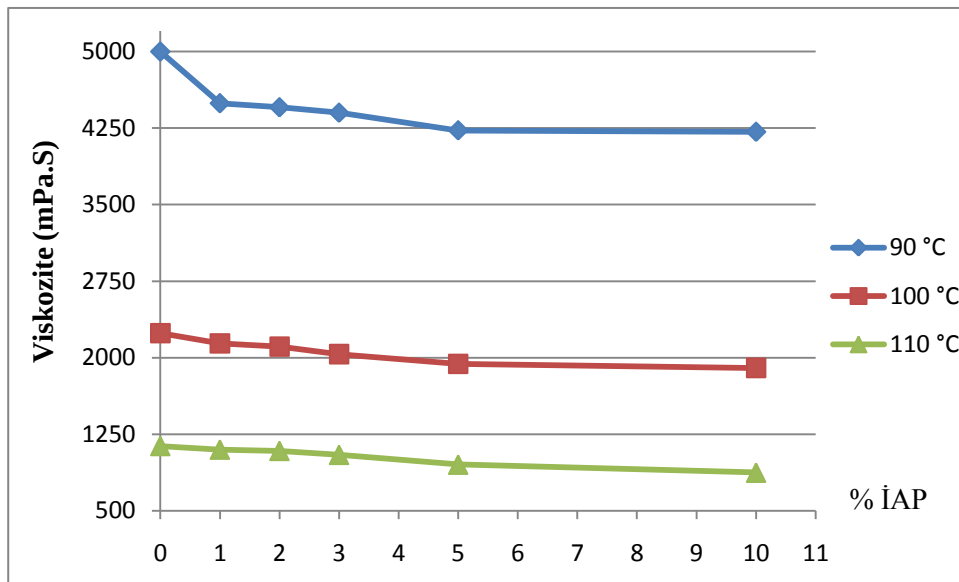
Sıcaklık (°C)	Bitüme kütlece İAP eklenme oranı					
	%0	%1	%2	%3	%5	%10
90	5000	4493	4453	4400	4227	4213
100	2240	2140	2108,5	2035	1940	1900
110	1135	1100	1087	1049	953,3	875
120	433	420	413,3	400	340	320
130	186	180	175	169	146,7	126
140	126	122	117	111,1	93,3	86
150	78	75	71,1	69	60	53
160	57	55	51,4	48,9	40	38,5

Çizelge 6.2’de görüldüğü gibi orijinal ve katkılı bitümlerde sıcaklığın artmasıyla viskozite değerleri azalmıştır. Ayrıca katkı maddenin artması ile viskozite değerlerinde de azalma görülmektedir.



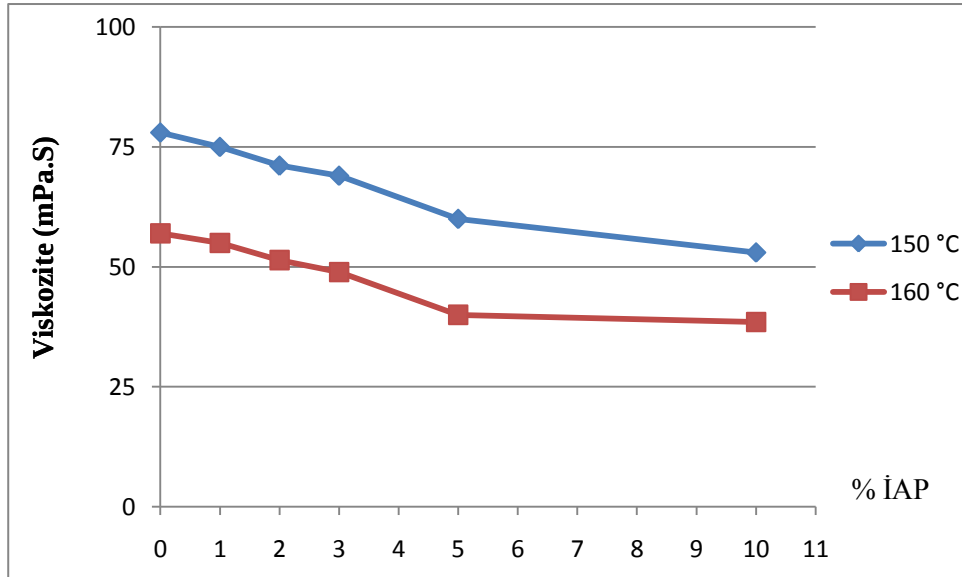
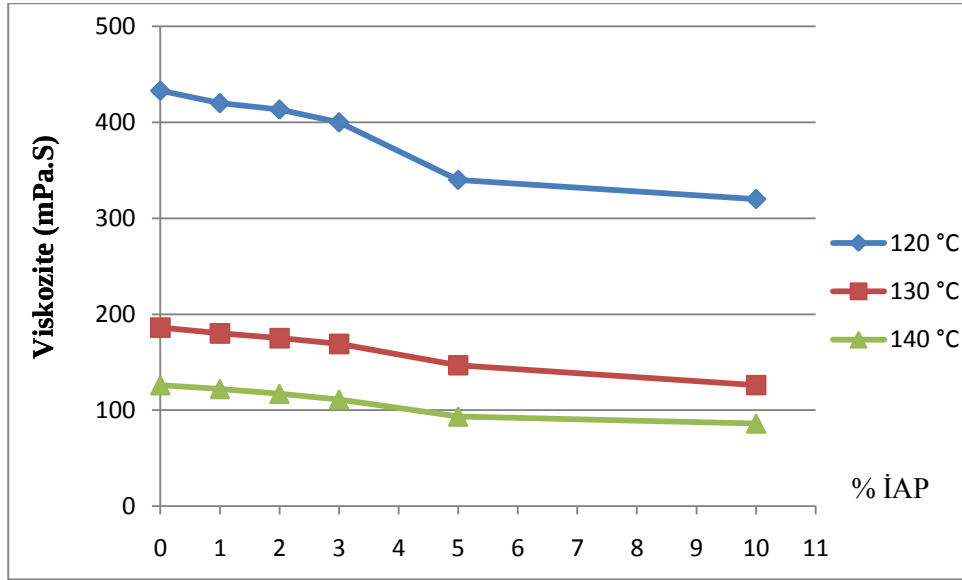
Şekil 6.2. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Viskozite sonuçlarındaki değişimi ve katkı maddelerinin eklenmesiyle oluşan değişimi daha iyi görmek için Çizelge 6.2’de verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına göre değişimleri tüm deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Buna göre şekil 6.3.a, 6.3.b ve 6.3.c oluşturulmuştur. Şekil 6.3.a’da 90°C ile 110°C, şekil 6.3.b’de 120°C ile 140°C ve şekil 6.3.c’de 150°C ve 160°C sıcaklık arasında, katkı maddenin oransal olarak eklenmesiyle viskozite sonuçlarındaki değişim görülmektedir.



Şekil 6.3. Bitüm viskozitesinin İAP konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi

- a. (90°C -110°C arasında)
- b. (120°C -140°C arasında)
- c. (150°C -160°C arasında)



Şekil 6.3 (Devam) Bitüm viskozitesinin İAP konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi

- a. (90°C -110°C arasında)
- b. (120°C -140°C arasında)
- c. (150°C -160°C arasında)

Şekil 6.2, Şekil 6.3a, Şekil 6.3b, ve Şekil 6.3.c incelendiğinde İAP'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- İAP'nin orijinal bitüme ilave edilmesiyle, bitümün viskozitesi azalmaktadır.
- Katkı maddesi arttıkça, viskozitedeki azalma artmaktadır.
- Sıcaklık arttıkça katkı maddenin viskozite üzerindeki etkisi azalmaktadır.

Ayrıca katkı maddesinin ilave edilmesiyle %3'ten %5 oranlar arasında en hızlı değişimi görülmektedir ve %5 oranı viskozite açısından optimum oran olarak seçilebilmektedir.

Çizelge 6.3'te modifikasyon sonucu orijinal viskoziteye göre oransal ve miktar değişimi görülmektedir.

Çizelge 6.3. İAP modifikasyonunun orijinal bitüm viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Bitüme kütlece İAP eklenme oranı				
	1%	2%	3%	5%	10%
90	10,14/-507	10,94/-547	12/-600	15,46/-773	15,74/-787
100	4,46/-100	5,87/-131,5	9,15/-205	13,39/-300	15,18/-340
110	3,08/-35	4,23/-48	7,58/-86	16,01/-181,7	22,91/-260
120	3,00/-13	4,55/-19,7	7,62/-33	21,48/-93	26,10/-113
130	3,23/-6	5,91/-11	9,14/-17	21,13/-39,3	32,26/-60
140	3,17/-4	7,14/-9	11,83/-14,9	25,95/-32,7	31,75/-40
150	3,85/-3	8,85/-6,9	11,54/-9	23,08/-18	32,05/-25
160	3,51/-2	9,82/-5,6	14,21/-8,1	29,82/-17	32,46/-18,5

Çizelge 6.3 incelendiğinde İAP ile modifiye edilmiş bitümün viskozite değeri, katkı maddenin artmasıyla azalmaktadır. İAP modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini miktar bakımından 787 mPa.s ve oransal olarak %32,46'ya kadar azaltmaktadır.

İAP ile modifiye edilmiş bitümün viskozitesi azalmaktadır. Viskozitenin azalmasıyla bitüm daha akıcı hale gelmektedir. Bitümün bu özelliğe sahip olması, esnek üst yapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli olmasını sağlar ve soğuk bölgelerde daha tercih edilmektedir [5]. Üstelik katkı maddesinin

kullanılmasıyla plent sıcaklığının azalmasına ve ona bağlı olarak bitümün yaşlanmaması yönünden de etkilidir.

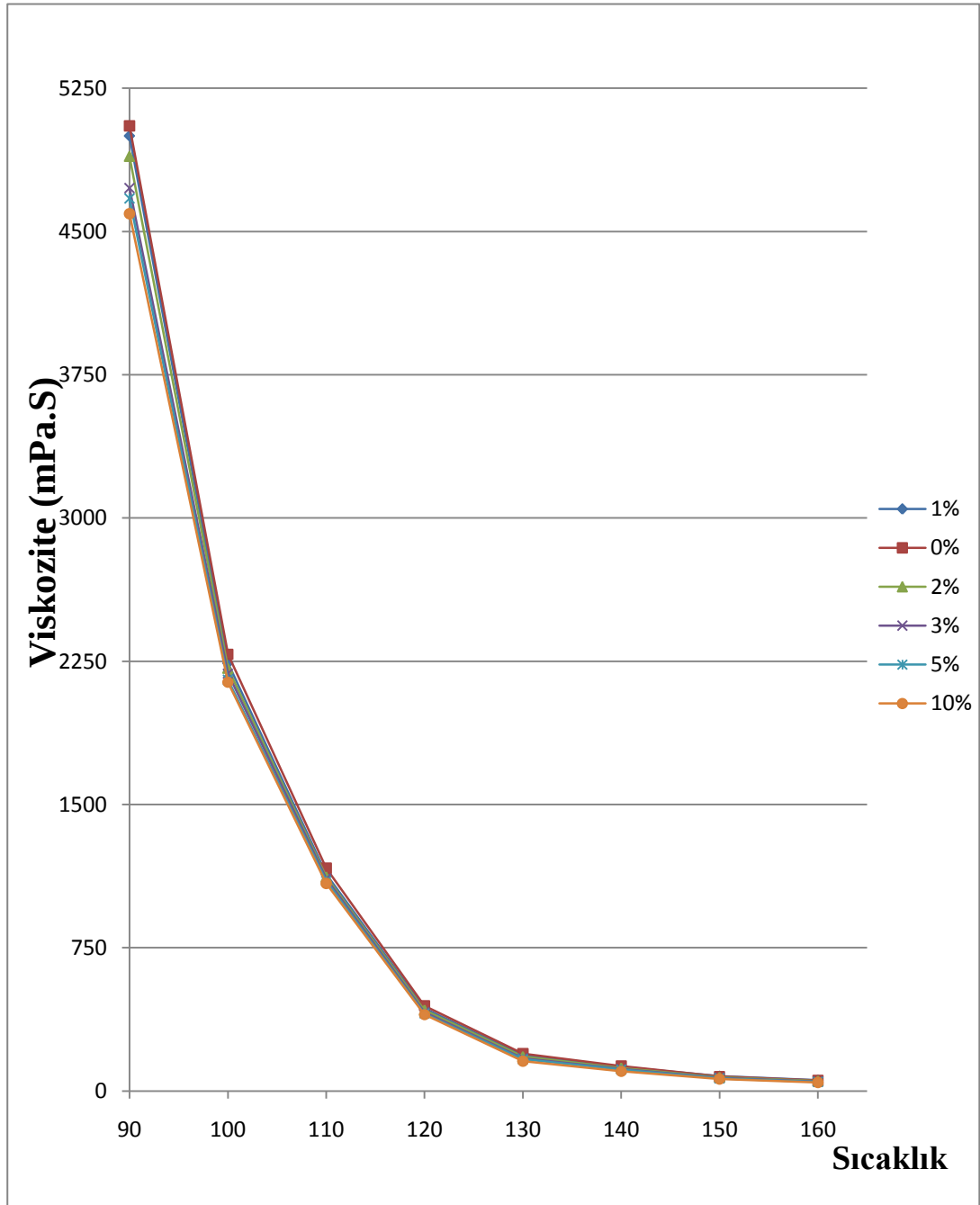
6.1.3. Viskoz Poliöl (VP) ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Çalışmada bitüme kütlece %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında viskoz poliöl (VP) ekleyerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Her modifiye edilmiş bitümün viskozitesi 90°C ile 160°C arasında toplam 8 farklı sıcaklıkta ölçülmüştür. Her sıcaklıkta en az beş ölçüm yapılmıştır ve viskozite değeri ölçümlerin ortalamasından elde edilmiştir. Çizelge 6.3’de orijinal ve VP katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. Viskozite sonuçları detaylı olarak Ek-11’de sunulmuştur.

Çizelge 6.4. Orijinal ve VP katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitüme kütlece VP eklenme oranı					
	saf	1%	2%	3%	5%	10%
90	5000	5053	4893	4727	4673	4593
100	2240	2287	2213	2185,5	2153	2140
110	1135	1167	1121	1112	1100	1087
120	433	446,7	424	413	406	400
130	186	196	180	172	166,7	156,6
140	126	130,6	120	115	112	103
150	78	76	72	69	66	63
160	57	55,5	53	50	48	45

Çizelge 6.3’te görüldüğü gibi VP ile modifiye edilmiş bitümün %1 oranında ve 90°C ile 140°C arasında viskozite değerinde bir artış görülmektedir. Diğer oran ve sıcaklıklarda viskozite değerleri orijinal bitüme göre düşüktür ama VP ile modifiye edilmiş bitümün İAP ile modifiye edilmiş bitüme göre viskozite değerleri daha yüksektir hatta Şekil 6.4’te görüldüğü gibi orijinal bitümün viskozite değerlerine daha yakındır.



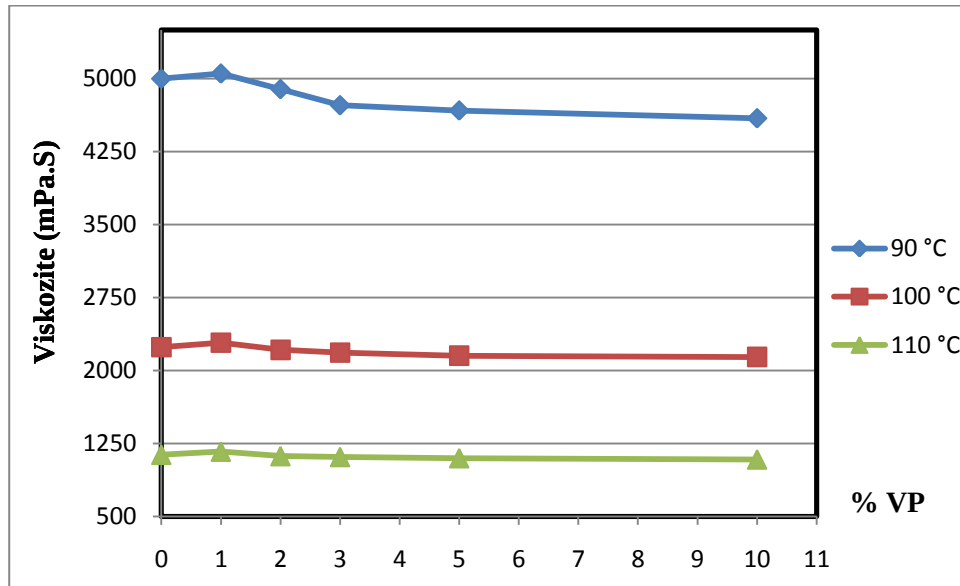
Şekil 6.4. Orijinal ve VP katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

VP ile modifiye edilmiş bitümün orijinal bitümün viskozitesine göre oransal ve miktar değişimi Çizelge 6.5'te görülmektedir.

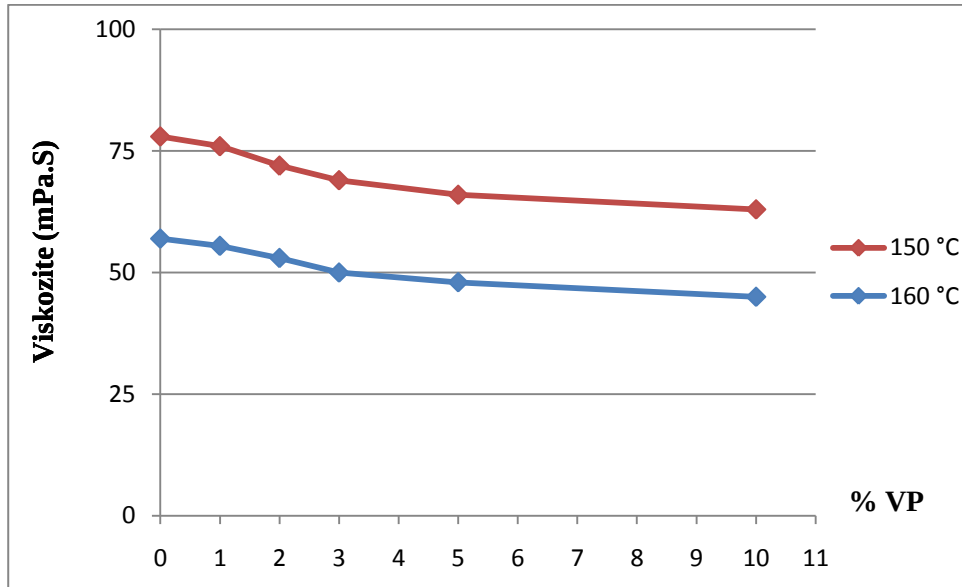
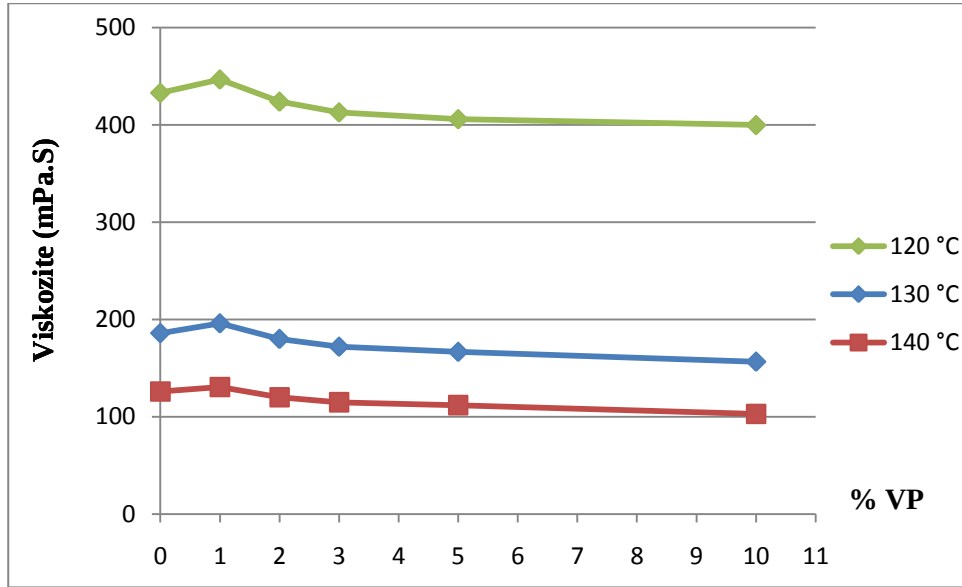
Çizelge 6.5. VP modifikasyonunun orijinal bitüm viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Bitüme kütlece VP eklenme oranı				
	1%	2%	3%	5%	10%
90	-1,06/53	2,14/-107	5,46/-273	6,54/-327	8,14/-407
100	-2,10/47	1,21/-27	2,43/-54,5	3,88/-87	4,46/-100
110	-2,82/32	1,23/-14	2,03/-23	3,08/-35	4,23/-48
120	-3,16/13,7	2,08/-9	4,62/-20	6,24/-27	7,62/-33
130	-5,38/10	3,3/-6	7,53/-14	10,38/-19,3	15,81/-29,4
140	-3,65/4,6	4,76/-6	8,73/-11	11,11/-14	18,25/-23
150	2,56/-2	7,69/-6	11,54/-9	15,38/-12	19,23/-15
160	2,63/-1,5	7,02/-4	12,28/-7	15,79/-9	21,05/-12

Ayrıca bu değişimi daha iyi göre bilmek için şekil 6.5.a, 6.5.b ve 6.5.c çizilmiştir. Şekil 6.5.a'da 90°C ile 110°C, şekil 6.5.b'de 120°C ile 140°C ve şekil 6.5.c'de 150°C ve 160°C sıcaklık arasında, katkı maddenin oransal olarak eklenmesiyle viskozite sonuçlarındaki değişim görülmektedir.



Şekil 6.5.Bitüm viskozitesinin VP konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi



Şekil 6.5 (Devam) Bitüm viskozitesinin VP konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi

- a. (90°C -110°C arasında)
- b. (120°C -140°C arasında)
- c. (150°C -160°C arasında)

Şekil 6.4, 6.5'a, 6.5'b ve 6.5'cyi incelendiğinde katkı maddenin ilave edilmesiyle bitümün viskozite değerleri %1 ve %2 oranında en hızlı değişimleri göstermektedir.

Katkı maddenin %1 oranı viskozitenin artmasında ve %2 oranı viskozite değerini azalmasında en etkili oranlardıdır.

Viskozitenin artmasıyla bitüm daha kıvamlı olup ve sıcak bölgelerde esnek kaplamalarda tercih edilmektedir. Bitümün bu özelliği sıcak havalarda kaplamada meydana gelen problemleri azaltır. Viskozite değerinin azalmasıyla ise bitüm daha akışkan hale gelip ve soğuk bölgelerde düşük havalardaki çatlakların oluşumunu engellemektedir [5].

Viskozite test sonuçları kapsamında İAP soğuk bölgelerde ve VP sıcak ve soğuk bölgelerde kullanılmasının uygun olacağı anlaşılmaktadır.

Bitümde meydana gelen yaşlanmanın yaklaşık %70'i plentte agrega ile karıştırması ve yola serilip sıkıştırması esnasında oluşmaktadır. Bitüm karıştırılma esnasında 200 mPa.s, sıkıştırma esnasında ise 500-3000 mPa.s akıcılıkta olması istenir [1]. Bitümün bu özelliklere sahip olabilmesi için plentte yaklaşık 160°C sıcaklıkta agrega ile karıştırılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan katkı maddeleri İAP tüm oranlarda ve VP %1 oranı hariç diğer tüm oranlarda viskoziteyi azaltmaktadır ve bu özellik bitümün plentte agrega ile karıştırmasının daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesine imkan verir.

Ek-10 ve EK-11'de verilmiş olan grafiklerde 200 mPa.s'lik viskozite değeri için gerekli olan sıcaklık değeri her bir bitüm için (orijinal ve modifiye) ayrı ayrı belirlenmiştir. Örneğin orijinal bitüme ait grafik incelendiğinde bu değerin 130°C olduğu görülmektedir. Yani orijinal bitüm kullanılması durumunda bitüm ile agreganın plentte en uygun karıştırılma sıcaklığı 130°C'dir. Katkılı bitümler için plent sıcaklığı çizelge 6.6'da sunulmaktadır.

Çizelge 6.6. Bitüme eklenen katkı maddesi türü ve miktarına göre plent sıcaklıkları (°C)

Kütlege katkı maddesi oranı	katkı maddesi türü	
	İAP	VP
0%	130	130
1%	129	130,5
2%	128,8	129,2
3%	128,5	129
5%	127,5	128,5
10%	126,5	128

Çizelge 6.6’da görüldüğü gibi katkı maddelerin kullanılması plent sıcaklığının azaltılabılmesine imkan vermektedir. Sonuç olarak modifiye edilmiş bitümlerin kullanılmasıyla yaşlanma miktarında azalma sağlanacaktır. Plent sıcaklığının azalmasıyla daha az enerji harcanıp enerji bakımından da tasarruf sağlanacaktır.

Düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar, esnek kaplamalarda görünen önemli bozulma türüdür. Bu bozulmalarda su çatlaklara nüfuz ederek kaplamanın beklenenden daha erken bozulmasına neden olmaktadır. Katkı maddelerin kullanılmasıyla karışım bu çatlaklara karşı daha dirençli olacaktır.

Tekerlek izi sıcak havalarda görünen en önemli bozulma türüdür. Tekerlek izi trafik güvenliğini olumsuz yönden etkiler. Yağış olduğu zamanlar yüzeysel sular bu bozulmadan oluşan oluklara toplanıp tehlikeyi artırır. VP’nin %1 oranı bitümün viskozitesini artırarak bitümlü karışımın bu tür bozulmalara karşı daha dirençli olmasını sağlayabilir. Ayrıca sıcak bölgelerde viskozitesi yüksek olan bitümlerin kullanılmasıyla karışımın kusması engellenmektedir.

6.2. Penetrasyon Test Sonuçları

Penetrasyon testi, orijinal ve katkılı bitümlerde bölüm 2.2.1’de (bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler) açıklandığı ve EK-1’de görüldüğü gibi uygulanmıştır. Çizelge 6.7’de deney sonunda elde edilen penetrasyon sonuçları görülmektedir.

Çizelge 6.7. Orijinal ve modifiye bitümlere ait penetrasyon sonuçları

Kütlece katkı maddesi oranı	Penetrasyon	
	İAP	VP
0%	45	45
1%	51	45
2%	54	50
3%	55	54
5%	56	57
10%	61	60

Çizelge 6.7’deki değerler incelendiğinde çalışmada kullanılan katkı maddelerin bitümün penetrasyonunda meydana getirdiği değişimler aşağıda özetlenmiştir:

- İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin penetrasyon değerleri orijinal bitüme göre artmıştır. İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin penetrasyon değerleri minimum %13,4 ve maksimum %35,6 oranıyla artmaktadır. Katkı maddenin kütlece artmasıyla bitümün penetrasyon değeri artmıştır.
- VP ile modifiye edilmiş bitümlerin penetrasyon değerleri orijinal bitüme göre artmıştır. Sadece %1 oranın penetrasyon değeri orijinal bitümün penetrasyonuyla aynıdır. VP ile modifiye edilmiş bitümlerin %1 oranında orijinal bitümle aynı penetrasyona sahip ve diğer oranlarda minimum %11,1 ve maksimum %33,3 oranlarında artmaktadır.

6.3. Yumuşama Noktası Test Sonuçları

Yumuşama noktası testi, orijinal ve katkılı bitümlerde bölüm 2.2.2’de (bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler) açıklandığı ve EK-2’de görüldüğü gibi uygulanmıştır. Çizelge 6.8’de farklı bitümler için deney sonunda elde edilen yumuşama noktaları görülmektedir.

Çizelge 6.8. Orijinal ve modifiye bitümlere ait yumuşama noktaları

Kütlece katkı maddesi oranı	Yumuşama noktası (°C)	
	İAP	VP
0%	51,5	51,5
1%	48,7	51,6
2%	48,3	50,3
3%	48,1	50,1
5%	47,9	50
10%	47,5	49,8

Çizelge 6.8’deki değerler incelenerek çalışmada kullanılan katkı maddelerin bitümün yumuşama noktasında meydana getirdiği değişimler aşağıda özetlenmiştir:

- İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin yumuşama noktası orijinal bitüme göre azalmıştır. Bu miktar %5,4 - %7,8 arasında değişmektedir.
- VP ile modifiye edilmiş bitümün yumuşama noktası orijinal bitüme göre daha düşük miktarlarda azalmaktadır. Bu miktar %1,7 - %3,3 arasında değişmektedir.

Yumuşama noktası, bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığının göstergesi olarak kullanılabilir. Daha yüksek yumuşama noktasına sahip bitümlerin kıvamlılıkları sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenir. Yani sıcaklık arttığında daha az akıcı hale gelirler. İAP ile modifiye edilmiş bitümler VP ile modifiye edilmiş bitümlere göre daha düşük yumuşama noktasına sahip yani sıcaklığa karşı daha çok duyarlıdırlar.

6.4. Düktilite Test Sonuçları

Düktilite testi, orijinal ve katkılı bitümlerde bölüm 2.2.4'te (bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler) açıklandığı ve EK-3'te görüldüğü gibi uygulanmıştır. Çalışmada düktilite testi 15°C sıcaklıkta yapılmıştır. Çizelge 6.9'da farklı bitümler için deney sonunda elde edilen düktilite sonuçları görülmektedir.

Çizelge 6.9. Orijinal ve modifiye bitümlere ait düktilite sonuçları

Kütlece katkı maddesi oranı	Düktilite (cm)	
	İAP	VP
0%	+100	+105
1%	+105	+105
2%	+105	84
3%	+105	77
5%	+105	68
10%	+100	55

Cihaz ile 105 cm'ye kadar ölçüm yapılabilmekte olup Çizelge 6.9'da görülen +105 değeri ile bitüm numunesinin test esnasında kopmadığı ifade edilmektedir.

Düktilite testi ile bitümün sünekliği ölçülür. Bitüm düşük hava sıcaklıklarında sünek davranış gösterebildiği takdirde bitümlü karışım düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli olacaktır.

Çizelge 6.9'daki değerler incelendiğinde çalışmada kullanılan katkı maddelerin bitümün düktilitesinde meydana getirdiği değişimler aşağıda özetlenmiştir:

- İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin düktilitesi +105cm'dir.
- VP ile modifiye edilmiş bitümlerin düktilitesi sadece %1 oranında +105cm 'dir ve bu değer katkı maddesi oranı arttıkça azalmaktadır.

Test sonuçlarına göre İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin düşük sıcaklıklardaki sünek davranış özelliği artmaktadır. Ayrıca bitümün viskozite ve yumuşama noktası

test sonuçları düktilite sonuçları ile aynı yönde olup modifiye edilen bitümün soğuk bölgelerde kullanılabileceğini göstermektedir.

6.5. Nicholson Soyulma Test Sonuçları

Nicholson soyulma testi, orijinal ve katkılı bitümlerde bölüm 2.2.5'te (bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler) açıklandığı ve EK-4'te görüldüğü gibi uygulanmıştır. Çizelge 6.10'da farklı bitümler için deney sonunda elde edilen soyulma sonuçları görülmektedir.

Çizelge 6.10. Orijinal ve modifiye bitümlere ait Nicholson soyulma test sonuçları

Kütlece katkı maddesi oranı	İAP		VP	
	Soyulma Direnci	Soyulma Oranı	Soyulma Direnci	Soyulma Oranı
0%	%60	%40	%60	%40
1%	%70	%30	%95	%5
2%	%75	%25	%90	%10
3%	%100	% 0	%90	%10
5%	%95	%5	%95	%5
10%	%90	%10	%90	%10

Yukarıda verilen sonuçların elde edildiği deney numunelerine ait fotoğraflar EK-'de sunulmuştur.

Çizelge 6.10 incelendiğinde katkı maddelerin kullanılmasıyla karışımın soyulma direnci arttığı görülmektedir. Özellikle VP ile modifiye edilmiş bitümler daha yüksek soyulma direncine sahiptir.

- İAP ile modifiye edilmiş bitümler %3 ve %5 oranlarında en yüksek soyulma direncine sahiptir. Özellikle %3 oranında hiç soyulma görülmemiştir.
- VP ile modifiye edilmiş bitümler tüm oranlarda soyulma direncini artırmışlardır.

Soyulma deneyi agrega ile bitümün yapışma özelliğini ölçmek için yapılan bir deney türüdür. Karışımın soyulmaya karşı daha dirençli olması agrega ile bitüm arasındaki

adezyonunun yüksek olduğunu ifade eder. Katkı maddelerin kullanılmasıyla karışımın adezyonu artmakta ve soyulmaya karşı daha dirençli olduğu görülmektedir.

6.6. Marshall Test Sonuçları

Orijinal ve %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında İAP ve VP ile modifiye edilmiş bitümlerden hazırlanan briketler Marshall deneyine tabii tutulmuşlardır. Her bir briketin direnç gösterebildiği maksimum yük ve bu yüke karşılık oluşan akma miktarları aynı zamanda ölçülmüştür. Her briketin yükseklik ve ağırlıkları (kuru, suda ve doymun yüzey) ölçülmüştür. Deneyde kullanılan agreganın özgül ağırlıkları izelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Agregaya ait özgül ağırlık değerleri

	Zahiri Özgül Ağırlık	Hacim Özgül Ağırlık
Kaba Agregası	2,709	2,643
İnce Agregası	2,778	2,732
Filler	2,823	-

Deneyde kullanılan bitümün özgül ağırlığı 1,02 bulunmuştur.

Çalışmada agreganın ağırlıkça %4, %4,5, %5 ve %5,5 oranlarında bitüm kullanarak ve her oran için 3 briket, toplam 12 briket hazırlanmıştır. Briketler hazırlandıktan 24 saat sonra yükseklik ve ağırlıkları ölçülüp Marshall deneyine tabii tutulmuşlardır. Ek-12’de detaylı olarak sunulduğu gibi briketlerin pratik özgül ağırlığı (Dp), boşluk oranı (Vh), bitümle dolu boşluk oranı (Vf), agregası boşluk miktarı (VMA) , stabilite ve akma değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca tüm stabilite ölçümlerinde cihazdan okunan değer, kalibrasyon katsayısı $(-11,75+3,75 \times \text{cihaz okuması})$ ile işleme sokulmuş ve elde edilen değer briketin yüksekliğine bağlı düzeltme katsayısıyla çarpılarak briketi ait düzeltilmiş stabilite değeri elde edilmiştir.

Orijinal bitüm ile hazırlanan briketlerin Marshall test sonuçları çizelge 6.12’de görülmektedir.

Çizelge 6.12. Briketlerde kullanılan orijinal bitüm oranına bağlı olarak Marshall tasarımında elde edilen ortalama değerler

Bitüm Oranı(%)	Dp	Stabilite (kg)	Vh (%)	Vf (%)	VMA (%)	Akma (mm)
4	2,407	815,24	6,45	58,28	15,46	2,21
4,5	2,421	855,61	5,21	66,07	15,37	2,16
5	2,431	927,80	4,16	73,06	15,34	2,17
5,5	2,427	881,30	3,63	77,26	15,97	2,30

Çizelge 6.12’deki değerlere göre çizilen ve optimum bitüm oranının hesaplanabilmesi için gerekli olan grafikler EK-13’te sunulmuştur. Optimum bitüm oranı, EK-13’ grafiklerden elde edilen değerlerle Çizelge 6.14’te görüldüğü şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.13. Orijinal bitümün optimum değeri

	Bitüm Oranı (%)	Optimum Bitüm Oranı (%)
Dp	5,14	$(5,14+5,06+5,2+4,786)/4=5,05$
Stabilite	5,06	
Vh	5,2	
Vf	4,786	

Çizelge 6.13’te görüldüğü üzere orijinal bitüm ile yapılan Marshall tasarımı sonucunda agrega- bitüm karışımında kullanılacak en uygun bitüm miktarı agrega ağırlığının %5,05’i olarak belirlenmiştir. Katkılı bitümler ile yapılan Marshall tasarım sonuçları EK -13’ten Ek-36’ya kadar sunulmuştur.

Karışımın optimum bitüm oranı Marshall tasarımından elde edilen stabilite, Dp, Vh ve Vf değerlerinin ortalamasından hesaplanır. katkı maddeler ile elde edilen optimum bitüm miktarı Çizelge 6.14 ve 6.15'te verilmiştir.

Çizelge 6.14. İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin optimum bitüm miktarı

Marshall deneyinde İAP katkı maddesi ile elde edilen optimum bitüm oranı %					
Bitüm Oranı	Dp	Stabilite	Vh	Vf	Optimum Bitüm Oranı %
%1	4,882	4,79	5,20	4,747	4,90
%2	4,964	4,298	5,491	4,905	4,91
%3	4,927	4,391	5,486	4,821	4,91
%5	4,95	4,327	5,498	4,889	4,92
%10	5,06	4,096	5,50	4,912	4,89

Çizelge 6.15. VP ile modifiye edilmiş bitümlerin optimum bitüm miktarı

Marshall deneyinde VP katkı maddesi ile elde edilen optimum bitüm oranı %					
Bitüm Oranı	Dp	Stabilite	Vh	Vf	Optimum Bitüm Oranı %
%1	4,9	5,08	5,15	4,70	4,96
%2	4,95	4,964	5,20	4,70	4,96
%3	4,97	5,014	5,22	4,72	4,98
%5	5	4,919	5,32	4,88	5,03
%10	4,98	4,665	5,50	4,90	5,01

Çizelge 6.14 ve 6.15'te görüldüğü üzere İAP katkı maddesi ile yapılan Marshall tasarımı sonucunda en uygun bitüm miktarı % 4,90 civarında olup orijinal bitümün optimum bitüm miktarından % 0,15 daha azdır. VP katkı maddesinin uygun bitüm miktarı orijinal bitümün optimum değerinden % 0,02 ile % 0,09 daha fazladır.

Bitümlü sıcak karışımların tasarımı Marshall stabilite deneyine göre yapılmaktadır. Katkı maddelerin bitümlü sıcak karışımlarda, stabilite üzerindeki etkisini belirlemek üzere katkılı ve katkısız bitümlerden toplam 12 briket hazırlanmıştır. Çizelge 6.16'da orijinal ve İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin stabilite değerleri görülmektedir.

Çizelge 6.16. Orijinal ve İAP ile modifiye edilmiş bitümlerin stabilite değerleri

Bitüm Oranı(%)	katkı maddenin (İAP) oranına bağlı stabilite değerleri					
	0%	1%	2%	3%	5%	10%
4	815,24	841,12	897,12	893,79	862,09	861,41
4.5	855,61	919,62	918,05	917,94	904,51	883,06
5	927,80	876,30	871,42	874,15	826,92	822,1
5.5	881,30	868,26	852,35	847,11	823,7	811,51

Çizelge 6.16 incelendiğinde bitümün %4 ve %4,5 oranlarında İAP ile modifiye edilen bitümlerin stabilite değerleri katkısız bitümün stabilite değerlerinden fazladır. %5 ve %5,5 oranlarında ise katkısız bitümün stabilite değerleri daha fazladır.

Çizelge 6.17’de orijinal ve VP ile modifiye edilmiş bitümlerin stabilite değerleri görülmektedir.

Çizelge 6.17. Orijinal ve VP ile modifiye edilmiş bitümlerin stabilite değerleri

Bitüm Oranı(%)	katkı maddenin (VP) oranına bağlı stabilite değerleri					
	0%	1%	2%	3%	5%	10%
4	815,24	870,52	856,93	858,89	856,69	872,18
4.5	855,61	947,27	911,35	897,51	894,24	902,00
5	927,80	981,09	956,57	954,46	905,92	883,17
5.5	881,30	944,77	912,28	911,71	885,48	864,79

Çizelge 6.17 incelendiğinde VP katkı maddesi ile hazırlanan briketlerin %1, %2 ve %3 oranlarında tamamıyla ve %5 ve %10 oranlarında sadece bitümün %4 ve %4,5 oranlarında stabilite değerinin artmasını sağlamıştır.

EK -13’ten Ek-36’ya kadar ayrıntılı olarak verilen Marshall test sonuçları incelendiğinde, modifiye bitümün kullanımı ile sıkıştırılmış briketlerde stabilitenin

artmasıyla pratik yoğunluk oranının (D_p), boşluk oranının (V_h) azaldığı ve bitümle dolu boşluk oranının (V_f) arttığı görülmektedir. Böyle bir sonuç daha iyi sıkışma ile elde edilebilir.

6.7. DSR (Dynamic Shear Rheometer) test sonuçları

DSR testi orijinal ve katkılı bitümlerde bölüm 2.4'te (asfalt özelliklerinin tayininde yeni yaklaşımlar) açıklandığı gibi uygulanmıştır. Viskozite ve diğer test sonuçlarını göze alarak ince akışkan poliölün %3 ve %5 oranı, viskoz poliöl ise %1 ve %2 oranı ile modifiye bitümler hazırlanıp DSR deneyine tabi tutulmuştur. Seçilen oranlar bitümde en hızlı ve etkili değişimi gösterdikleri için seçilmişlerdir.

Test sonuçlarında elde edilen G^* ve δ değerleri $G^*/\sin\delta$ şeklinde tekerlek izine karşı ve $G^*\times\sin\delta$ şeklinde yorulma direncini ölçmek için kullanılır. Superpave şartnamesine göre $G^*/\sin\delta$ değeri yaşlandırılmamış bitümler için en az 1 kPa ve yaşlandırılmış bitümler için en az 2,2 kPa ve $G^*\times\sin\delta$ değeri yaşlandırılmış bitümler için maksimum 5000 kPa olmalıdır. Yaşlandırma işlemi PAV ve RTFO cihazları ile yapılmaktadır.

DSR testi orijinal ve modifiyeli bitümler için 64°C ve 70°C'de ve PAV'dan sonra 25°C ve 28°C uygulanmıştır. Test sonunda elde edilen değerlerle her bir bitüm için $G^*/\sin\delta$ ve PAV sonrası yaşlandırılmış bitüm için $G^*\times\sin\delta$ değerleri hesaplanarak tekerlek izi ve yorulma direnci üzerinde modifikasyonun etkisi değerlendirilmiştir [7]. DSR testlerinde elde edilen G^* ve δ değerleri orijinal ve yaşlandırılmış bitümler için Çizelge 6.18, 6.19 ve 6.20'de toplu halde sunulmuştur.

Çizelge 6.18. Yaşlandırılmamış bitümlerin G^* ve δ değerleri

Bitüm türü	Test sıcaklığı 64°C		Test sıcaklığı 70°C	
	$G^*(kPa)$	$\delta (^{\circ})$	$G^*(kPa)$	$\delta (^{\circ})$
Saf bitüm	1,4195	88,07	0,63931	88,85
%3 İAP	1,3564	86,94	0,72465	88,01
%5 İAP	1,1969	86,18	0,57001	87,46
%1 VP	1,1846	87,60	0,59576	88,15
%2 VP	1,3097	87,76	0,61173	88,62

Çizelge 6.19. RTFO sonrası G^* ve δ değerleri

Bitüm türü	Test sıcaklığı 64°C		Test sıcaklığı 70°C	
	$G^*(kPa)$	$\delta (^{\circ})$	$G^*(kPa)$	$\delta (^{\circ})$
Saf bitüm	3,0898	86,24	1,5679	87,69
%3 İAP	3,0213	85,79	1,3596	87,23
%5 İAP	3,0292	85,36	1,3538	86,90
%1 VP	3,0696	85,75	1,3523	87,18
%2 VP	3,0793	85,81	1,3729	87,25

Çizelge 6.20. PAV sonrası G^* ve δ değerleri

Bitüm türü	Test sıcaklığı 25°C		Test sıcaklığı 28°C	
	$G^*(kPa)$	$\delta (^{\circ})$	$G^*(kPa)$	$\delta (^{\circ})$
Saf bitüm	8031	50,28	5206,2	53,47
%3 İAP	5357,3	53,80	-	-
%5 İAP	7297,2	50,05	4699,9	53,23
%1 VP	6870,7	51,69	4501,2	54,72
%2 VP	8558	49,07	5417,7	52,32

Çizelge 6.18 ve 6.19 incelendiğinde saf ve katkılı bitümler 64°C sıcaklıkta superpave şartname sınırlarını sağlamaktadır. 70°C sıcaklık ise hiçbir şartname sınırlarını sağlamamaktadır.

Çizelge 6.20 incelendiğinde sadece %3 İAP katkılı bitüm şartname sınırını sağlamaktadır.

Çizelge 6.18, 6.19 ve 6.20'deki verilerle her bir bitüm için test sıcaklıklarında hesaplanan $G^*/\sin\delta$ ve $G^*\times\sin\delta$ değerleri Çizelge 6.21, 6.22 ve 6.23'te sunulmuştur.

Çizelge 6.21. Yaşlandırılmamış bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri

Bitüm türü	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	
	64°C	70°C
Saf bitüm	1,4203	0,63944
%3 İAP	1,3583	0,72509
%5 İAP	1,1996	0,57057
%1 VP	1,1856	0,59607
%2 VP	1,3107	0,61191

Çizelge 6.22. RTFO sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri

Bitüm türü	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	
	64°C	70°C
Saf bitüm	3,0965	1,5692
%3 İAP	3,0295	1,3612
%5 İAP	3,0391	1,3558
%1 VP	3,078	1,3539
%2 VP	3,0875	1,3745

Çizelge 6.23. PAV sonrası $G^*\times\sin\delta$ değerleri

Bitüm türü	$G^*\times\sin\delta$ (kPa)	
	25°C	28°C
Saf bitüm	6177	4183,5
%3 İAP	4323	-
%5 İAP	5594,2	3764,6
%1 VP	5391,2	3674,7
%2 VP	6465,2	4287,9

Çizelge 6.21 ve 6.22’de görüldüğü üzere $G^*/\sin\delta$ değerinde küçük azalmalar görülmüş ve yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış saf ve katkılı bitümler aynı performans sınıfında kalıp katkı maddesi yüksek sıcak performansını değiştirmemektedir.

Çizelge 6.23 incelendiğinde PAV sonrası sadece %3 İAP katkılı bitüm yorulma direnç açısından yaklaşık %33,3 bir kazanç sağlamıştır. %1 VP katkılı bitümde ise yorulma direncinde yaklaşık %13 bir artış görülmektedir ve katkı maddenin düşük oranda olması bir başka avantaj sağlamaktadır.

6.8. BBR (Bending Beam Rheometer) test sonuçları

BBR testi orijinal ve katkılı bitümlerde bölüm 2.4’te (asfalt özelliklerinin tayininde yeni yaklaşımlar) açıklandığı gibi uygulanmıştır. Viskozite ve diğer test sonuçlarını göze alarak ince akışkan poliolun %3 ve %5 oranı, viskoz poliol ise %1 ve %2 oranı ile modifiye bitümler hazırlanıp BBR deneyine tabi tutulmuştur. Seçilen oranlar bitümde en hızlı ve etkili değişimi gösterdikleri için seçilmişlerdir.

BBR testi bitümlere -6°C , -12°C ve -18°C ’de uygulanmıştır. Test sonuçları ile bitümün düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamalara karşı direnci üzerinde modifikasyonun etkisi değerlendirilmiştir. Testte, sünme rijitliği (S) ve sünme oranı (m) elde edilmektedir. -6°C , -12°C ve -18°C ’de elde edilen test sonuçları Çizelge 6.24 ve 25’te verilmiştir.

Çizelge 6.24. BBR test sonuçları

Bitüm türü	Test sıcaklığı -6°C		Test sıcaklığı -12°C	
	Sünme rijitliği, S (Mpa)	Sünme oranı, m	Sünme rijitliği, S (Mpa)	Sünme oranı, m
Saf bitüm	119	0,378	221	0,318
%3 İAP	93,2	0,388	214	0,377
%5 İAP	98,8	0,378	215	0,317
%1 VP	103	0,383	204	0,328
%2 VP	112	0,369	247	0,311

Çizelge 6.25. BBR test sonuçları

Bitüm türü	Test sıcaklığı -18°C	
	Sünme rijitliği, S(Mpa)	Sünme oranı, m
Saf bitüm	485	0,255
%3 İAP	366	0,274
%5 İAP	455	0,241
%1 VP	407	0,262
%2 VP	507	0,253

Çizelge 6.24 incelendiğinde orijinal ve modifiyeli bitümler -6°C ve -12°C’de şartname değerlerini sağlamışlardır. Katkı maddelerin kullanılmasıyla bitümün sünme rijitliği azalmıştır. Sünme rijitliği, bitümün düşük sıcaklıklardaki çatlama direncinin göstergesi olarak kullanılabilir. Sünme rijitliği yüksek olan bitüm gevrek davranış göstereceğinden düşük sıcaklıklarda daha çok çatlama eğilimi gösterir [5]. Ayrıca -12°C’de, %3 İAP katkılı bitümün orijinal bitüme göre sünme oranında yaklaşık %18,5 artış görülmektedir. sünme oranı (m) bitümün düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı direncinin gösterir. sünme oranının yüksek olması istenir. Daha yüksek m değerine sahip olan bitüm sıcaklık azalmasına daha düşük rijitlikle tepki verecektir. Böyle bir davranış özelliğine sahip bitüm düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamalara karşı daha dirençli olur [18].

Çizelge 6.25 incelendiğinde -18°C’de şartname değerleri hiçbir bitüm için sağlanmamaktadır.

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Bitüm, yol üst yapısında kullanılan en önemli bağlayıcıdır ve sahip olduğu özellikler üstyapı performansını yakından etkiler. Bu çalışmada pet şişlerinden elde edilen ince akışkan poliol ve viskoz poliol katkı maddesi olarak bitüme ilave edilerek bitümün özellikleri geliştirilmiştir. Katkı maddelerinin bitüm ve agrega-bitüm karışım özelliklerinde meydana getirdiği değişimler viskozite testleri, yumuşama noktası testleri, penetrasyon testleri, düktilite testleri, DSR (Dynamic Shear Rheometer) testleri, BBR (Bending Beam Rheometer) testleri, Marshall testleri ve Nicholson soyulma testiyle değerlendirilmiştir.

Orijinal bitümde ince akışkan poliol modifikasyonu sonucu meydana gelen değişimler Çizelge 7.1’de, viskoz poliol modifikasyonu sonucu meydana gelen değişimler ise Çizelge 7.2’de özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 7.1. İnce akışkan poliölün bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler

Katki maddesi	İlave oranı	Viskozite	Penetrasyon	Yumuşama noktası	Düğüllite	BBR		Marshall stabilite	Soyulma direnci
						Sünme rijitliği	Sünme oranı		
İAP	%1	%3-%10,14 arasında azalma	6 mm artma	2,8 °C azalma	kırılmadı	-	-	%3,2-%7,5 arasında artma	%16,6 artma
	%2	%4,23-%10,94 arasında azalma	9 mm artma	3,2 °C azalma	kırılmadı	-	-	%7,3-%10 arasında artma	% 25 artma
	%3	%7,58-%14,21 arasında azalma	10 mm artma	3,4 °C azalma	kırılmadı	%3,2 azalma	% 18,5 artma	%7,3-%9,6 arasında artma	% 66,7 artma
	%5	%13,39-%29,82 arasında azalma	11 mm artma	3,6 °C azalma	kırılmadı	%2,8 azalma	artma yok	%5,6-%5,7 arasında artma	%58,3 artma
	%10	%15,18-%32,46 arasında azalma	16 mm artma	4 °C azalma	kırılmadı	-	-	%3,2-%5,6 arasında artma	%50 artma

Çizelge 7.2. Viskoz poliölün bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler

Katki maddesi	İlave oranı	Viskozite	Penetrasyon	Yumuşama noktası	Düktilite	BBR		Marshall stabilite	Soyulma direnci
						Sünme rijitliği	Sünme oranı		
VP	%1	%1,06-%5,38 arasında artma	Artma yok	0,1 °C artma	kırılmadı	%7,7 azalma	% 3,14 artma	%5,7-%10,7 arasında artma	%58,3 artma
	%2	%1,21-%7,69 arasında azalma	5 mm artma	1,2 °C azalma	21cm azalma	%11,8 artma	%2,2 azalma	%3,1-%6,5 arasında artma	% 50 artma
	%3	%2,03-%12,28 arasında azalma	9 mm artma	1,4 °C azalma	28 cm azalma	-	-	%2,9-%5,4 arasında artma	% 50 artma
	%5	%3,08-%15,79 arasında azalma	12 mm artma	1,5 °C azalma	37 cm azalma	-	-	%0,5-%5,1 arasında artma	%58,3 artma
	%10	%4,23-%21,05 arasında azalma	15 mm artma	1,7 °C azalma	50 cm azalma	-	-	%5,4-%7 arasında artma	%50 artma

Viskozite test sonuçları incelendiğinde ince akışkan polioliol'da %5 oranı ve viskoz polioliol'da %1 ve %2 oranlarında en hızlı değişim olduğu görülmektedir.

Penetrasyon ve yumuşama noktası test sonuçları viskozite test sonuçları ile uyumludur olup katkı maddelerinin kullanılmasıyla viskozite azalmış, penetrasyon artmış ve yumuşama noktası azalmıştır.

Nicholson soyulma testi sonuçları incelendiğinde ince akışkan polioliolda %3 ve %5 oranlarında ve viskoz polioliolda ise uygulanan tüm oranlarda soyulma direnci %60'tan %95'e artmıştır. Katkı maddelerinin bu özelliği bitüm ve agrega arasındaki adezyonu arttırmaktadır ve böylece kaplamada meydana gelen soyulma problemi azalacaktır. Orijinal bitüm düşük polariteye, agrega ise yüksek polariteye sahiptir. Bitümlü karışımlarda meydana gelen soyulma bitüm ve agreganın sahip oldukları farklı polarite özelliklerinden kaynaklanır. İAP ve VP polar uçlar ve polar kısımlardan oluşmaktadır. İAP ve VP bitüme ilave edildiğinde katkı maddelerin apolar kısımları bitüm merkezinde toplanırken polar uçları bitümün yüzeyine doğru itilir. Bu durum bitümün yüzeyde polar özellik göstermesini sağlar ve böylece polar özellik gösteren agrega ile bitüm arasında güçlü bağlar oluşarak bitüm-agrega ara yüzeyindeki adezyonda artış sağlanır.

İnce akışkan polioliolun %3 ve %5 oranlarında kullanılmasıyla bitümün viskozitesi, yumuşama noktası ve sünme rijitliği azalmakta ve sünme oranı artmaktadır. Bu özellikleri göze alarak bu katkı maddesi bitümün soğuk bölgelerde düşük sıcaklık sebebiyle oluşan çatlaklara karşı direncini arttırması beklenmektedir.

Viskoz polioliol %1, %2 ve %3 oranlarında bitümlü karışımın stabilite değerini arttırmıştır. Böylece kaplama, deformasyonlara karşı daha dirençli olacaktır. Bu sonuç, katkı maddesinin trafiğin yoğun olduğu karayolu kesimleri için uygun olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, atık PET şişeleri ana katkı maddesi olarak kullanılmıştır. PET, birincil derecede doğada kendiliğinden yok olmaması ve hızlı bir şekilde atığa dönüştürülmesi nedeniyle, ekonomik ve ekolojik olarak değerlendirmenin bitümde katkı maddesi olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Whiteoak, D., “Shell Bitüm El Kitabı”, Editörleri, Abdullah Hilmi Lav, M. Aysen Lav, **İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.**, İstanbul, 28-29, 33-34, 47-50, 57, 86-88, 92, 101-114, 122-123, 133-136, 145, 148-150, 152-159, 161, 243-248 (2004).
2. İnternet: Karayolları Genel Müdürlüğü “2013 Yol Ağı Bilgileri” <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> (2013).
3. Türel, Ö., “Antalya ve Çevre İllerdeki Bölgesel Devlet Yollarının Mevcut Üstyapı Uygulamalarının İncelenmesi, Rijit Üstyapı Formunda Yeniden Çözülmesi, Maliyet Karşılaştırmalarının Yapılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek lisans Tezi, **Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Antalya, 236 (2002).
4. Orhan, F., “Bitümlü Karışımlar Laboratuvar Çalışmaları”, **Kara Yolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı**, Ankara, 11, 18, 26-28 (2012).
5. Tunç, A., “Yol Malzemeleri ve Uygulamaları”, **Nobel Yayın Dağıtım**, Ankara, 57-67, 72, 76-83, 97-101, 107-111, 116, 130-132, 140-142, 147, 168-169, 222-231 (2007).
6. Sayın, E., Yıldırım, B., “Asfalt Betonu Kaplamaların Farklı Sıcaklıklarda Dayanımı”, **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimler Dergisi**, 17 (3): 463-469 (2005).
7. Arslan, D., “Esnek Üstyapıların Performans Özelliklerinin Sentetik Metal ve Polibor katkı Maddeleriyle Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2010).
8. Önal, M.A., Kahramangil, M., “Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı”, **KaraYolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Daire Başkanlığı**, Ankara, (1993).
9. Moghaddam, T.H., Karim, M.R., Syammaun, T., “Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles”, **Construction and Building Materials**, 34:236-242 (2012).
10. Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Shafigh, P., “Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt”, **Materials and Design**, 32:4844-4849 (2011).

11. Umar, F., Ağar, E., “Yol Üstyapısı”, ***İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası***, İstanbul (1985) .
12. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., “Asfalt ve Uygulamaları”, ***İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.***, İstanbul, 33, 37-51, 53, 56-58,60-62,72-87, 90, 93 (2001).
13. Keçeciler, A.F., Gümrükçüoğlu, A., Akkol, G., Gökçe, A.F., “Bitümlü Malzemeler El Kitabı”, ***Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Daire Başkanlığı***, Ankara, (1979).
14. Orhan, F., “Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları”, ***Karayolları Genel Müdürlüğü***, Ankara, 10-24 (2005).
15. Tunç, A., “Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı”, ***Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti.***, Ankara, 90, 98-99, 105, 107, 165-166 (2004).
16. Atkinson, K., “Highway Maintenance Handbook”, ***Thomas Telford Ltd.***, London, 92-93 (1990).
17. Hallaç, M., Turğut, P., Arslan, A., “Bitüm Emülsiyonların Asfaltlı Üstyapı Malzemesi Olarak Yollarda Kullanımı”, ***GAP IV. Mühendislik Kongresi Bildiriler Kitabı***, Şanlıurfa (2002).
18. Lavin, P. G., “Asphalt Pavements”, ***Spon Press***, London and New York, 2, 8, 21-27, 188 (2003).
19. Chunfa, O., Shifeng, W., Yong, Z., Yinxi, Z., “Improving the aging resistance of asphalt by addition of Zinc dialkyldithiophosphate”, ***Fuel***, 85: 1060–1066 (2006).
20. Çubuk, M., “Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi”, Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, (2007).
21. Özgan, E., Kap, T., “Asfalt çimentolarında bekleme süresi ve ortam sıcaklığının düktüliteye etkisi”, ***SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 9 (1): 43-47 (2005).
22. TS 1090 EN 12592, “Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Çözünürlük Tayini”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, (2002).
23. TS EN 12607-2, “Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karsı Direncin Tayini-Bölüm 2: TFOT (Etüvde ince Film Deneyi) Yöntemi”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, (2003).

24. Dinç, E., “Performans Sınıfı Asfaltlar-Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri”, **T.C. Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü**, Sivas, 11, 17-35 (1999).
25. Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., “Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 19 (2): 175-184 (2004).
26. Superpave for the Generalist Engineer and Project Staff, **US. Department of Transportation Federal Highway Administration, National Highway Institute**, Publication No: FHWA HI 97-031, USA, (1997).
27. Dinç, E., ve Yazıcı, A., “Superpave Bitüm Deneyleri ve Agrega Gradasyonu”, **3. Asfalt Sempozyumu**, Ankara, 161-172, 16-17 (2000).
28. Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Superpave Series No. 1 (SP-1); **Asphalt Institute**, Kentucky, (1994).
29. Zaniwski, J. P., Pumphrey, M. E., “Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol”, **Asphalt Technology Program**, 107 (2004).
30. Mcgennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., “Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods”, **FHWA-SA-94-069**, 104 (1994).
31. Yılmaz, M., Ahmedzade, P., “Saf ve sbs modifiyeli bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmadan sonraki özelliklerinin iki farklı yaşlandırma yöntemi kullanılarak incelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 23(3): 569-575 (2008).
32. Ünal, E. N., “Asfaltın Kalite Özelliklerinin Katkı Maddesi İle İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 31-36 (1997).
33. Şengöz, B., Ağar, E., “Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi”, **İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi**, 4 (1): 71-82 (2005).
34. Özgan, E., Serin, S., Ertürk, S., Hastür, C., Metin, E., “Karayolu Esnek Üstyapısının Projelendirilmesi”, **D100-11 Karayolu Örneği**, Düzce, (2010).
35. Legault, R., “Highway and transport engineering, prentice-hall”, **INC, Engwood cliffs**, New Jersey, 194-199, 261-278 (1960).
36. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, **Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı**, Ankara, 93 (1995).

37. Uluçaylı, M., “Türkiye’de Asfalt Betonlu Kaplamalar ve Alternatifleri”, **Karayolları Teknik Bülteni**, Ankara, 16(65), (1975).
38. Croney, P., Croney, D., “The Design and Performance of Road Pavements”, **McGraw Hill**, New York, 508 (1998).
39. Tosun, N., “Bitümlü Kaplamalar Uygulama Kitabı”, **Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü Yıldırım** , Bursa.
40. Chen, H.D., Bilveu, J., Scullion, T., Lin, D.F., Zhou, F., “Forensic Evaluation of Premature Failures of Texas Specific Pavement Study–1 Sections”, **Journal of Performance of Constructed Structures**, 17(2): 67-74(2003).
41. Susa, J.B., Craus, J. Monismith, C.L., “Summary Report on Plastic Deformation in Asphalt Concrete”, **SHRP-A/TR-91-104, SHRP National Research Council**, Washington (1991).
42. Jones, R., “Modifiers for Asphalt Concrete”, **Air Force Engineering and Service Center project**, ESL–TR–88-32, 93 (1990).
43. Isacsson, U., Lu, X., “Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens”, State of the Art, **Materials and Structures**, 28, 139-159, (1995).
44. Yıldırım, Y., “Polymer Modified Asphalt Binders”, **Construction and Building Materials**, 21: 66-72 (2007).
45. Tapkın, S., Cevik, A., Usar, U., “Accumulated strain prediction of polypropylene modified Marshall specimens in repeated creep test using artificial neural networks”, **Expert Syst Appl** , 36:11186-97 (2009).
46. Isacsson, U., Lu, X., “Characterization of Bitumens Modified with SEBS, EVA and EBA Polymers”, **Materials Science**, 34: 3737-3745 (1999).
47. Al-Hadidy, Al., Yi-qiu, T., “Mechanistic approach for polypropylene –modified flexible pavements”, **Construction and Building Materials**, 30:1133-40 (2009).
48. Al-Hadidy, Al., Yi-qiu, T., “Effect of polyethylene on life of flexible pavements”, **Construction and Building Materials**, 23: 1456-64 (2009).
49. Vasudevan , R., Ramalinga, A., Sundarakannan, B., Velkennedy, R., “A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements”, **Construction and Building Materials** , 28: 311-320 (2012).

50. Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, MR., Abdelaziz, M., Shafigh, P., "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt", ***Material and Design***, 32: 4844-49(2011).
51. Baghaee Moghaddam, T., Karim ,MR., Syammaun, T., "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles", ***Construction and Building Materials***, 34: 236-242 (2012).
52. Awwad, M.T., SHbeeb, L., "The use of polyethylene in hot asphalt mixtures", ***Am J Appl Sci***, 4(6): 360-366 (2007).
53. Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., "Improvement of hot mix asphalt performance in cold region by organic-based synthetic compounds", ***Cold Regions Science and Technology***, 85: 250-255 (2013).
54. Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., "Performance assessment of organic-based synthetic calcium and boric acid modified bitumens", ***Fuel***, 102: 766-772 (2012).
55. Çubuk, M., Gürü, M., Çubuk, M.K., "The effect of polytetrafluoroethylene on the rheological properties of bitumen", ***Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University***, 26(3): 623-630 (2011).
56. Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., "Improvement of bitumen and bituminous mixtures performance properties with organic based zinc phosphate compound", ***Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University***, 27(2): 459-466 (2012).
57. Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., "Improvement of bitumen and bituminous mixtures performance by triethylene glycol based synthetic polyborn", ***Construction and Building Materials***, 25: 3863-3868 (2011).
58. Al-Hadidy, A.I., Tan, Y., "Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements", ***Construction and Building Materials***, 23(8): 2941-2950 (2009).
59. Hınıslioğlu, S., Ağır, E., "Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix", ***J Mater Lett***, 58:267-71 (2004).
60. Zoorob, SE., Suparma, Lb., "Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt)", ***Cem Concr Compos***, 22:233-42 (2000).

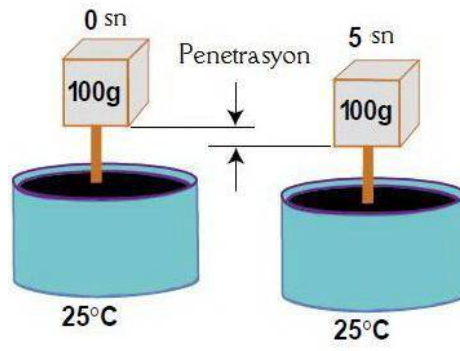
61. Kamada, O., Yamada, M., “Utilization of waste plastic in asphalt mixture”, ***Mem Faculty Engineering Osaka University***, 43:111-8(2002).
62. Taşdemir, Y., “High temperature properties of wax modified binders and asphalt mixers”, ***Construction and Building Materials***, 23: 3220-4 (2009).
63. Kalantar, ZN., Karim, MR., Mahrez, A., “A review of using waste and virgin polymer in pavement”, ***Construction and Building Materials***, 33: 55-62 (2012).
64. Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakannan, B., Velkennedy, R., “A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way- Application in construction of flexible pavements”, ***Construction and Building Materials***, 28: 311-320 (2012).
65. Nadkarni, V. M., Shenoy, A. V., Mathew, J., “Thermomechanical behavior of modified asphalts”, ***Ind. Eng. Chem. Pord. Res. Dev.***, 24: 478-484 (1985).
66. Geçkil, T., Alataş, T., Ahmedzade, P., “Siyah karbonun bitümün tekerlek izi dayanımı üzerindeki etkisi”, ***6th International Advanced Technologies Symposium***, (2011).
67. Ahmedzade, P., Yılmaz, M., “stiren-butadien-stiren modifikasyonunun bitümlü bağlayıcıların ısı duyarlılığı, rijitlik ve yaslanma özellikleri üzerindeki etkisi”, ***Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 11(3): 232-238 (2007).
68. Moghadas Nejad, F., Aghajani, P., Modarres, A., Firoozfar, H., “Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods”, ***Construction and Building Materials***, 26: 481-489 (2012).
69. Bilici, İ., “Atık plastiklerden kompozit malzeme üretimi ve karakterizasyonu”, Doktora Tezi, ***Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 2012.
70. Pehlivan, E., Ünal, S., Tunçsiper, B., “Polimer işleme ve geri kazanımı” ***sempozyumu bildiri kitabı***, 114-127 (2004).

EKLER

EK-1 Penetrasyon test cihazı



Resim 1.1. Penetrasyon cihazı



Şekil 1.2. Penetrasyon deney işleyişi

EK- 2 Yumuşama noktası test cihazı



Resim 2.1. Yumuşama noktası ölçümü

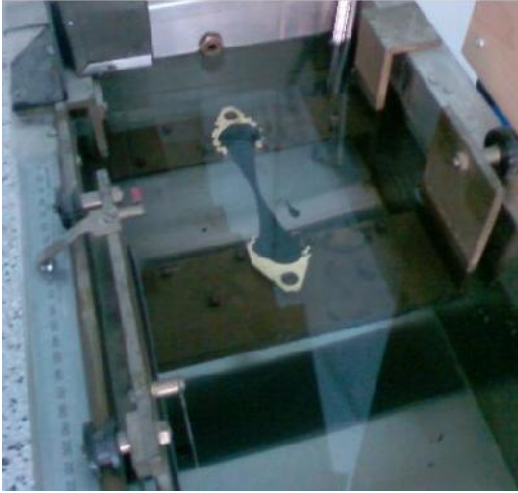


Resim 2.2. Yumuşama noktası cihazı

EK- 3 Düktilite test cihazı



Resim 3.1. Düktilite test cihazı ve numuneleri

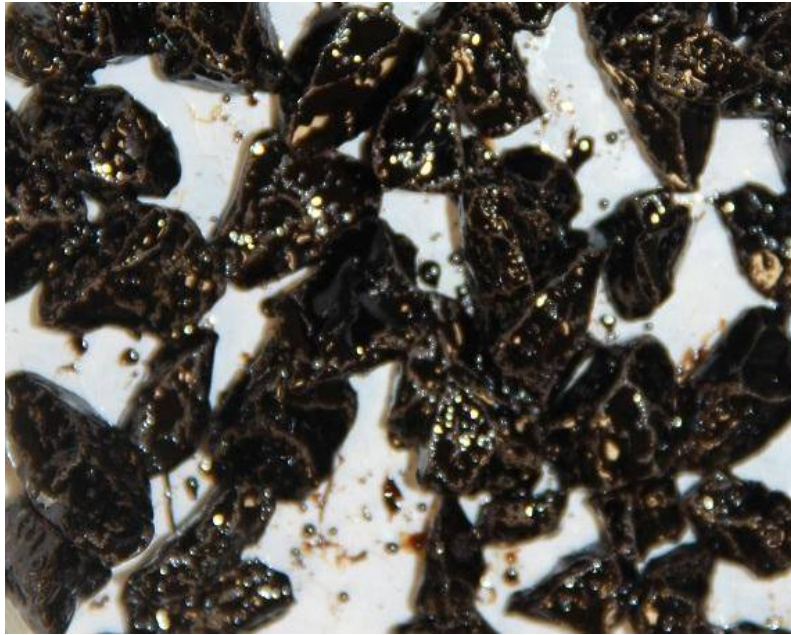


Resim 3.2. düktilite  l  m 

EK- 4 Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Orijinal Bitüm



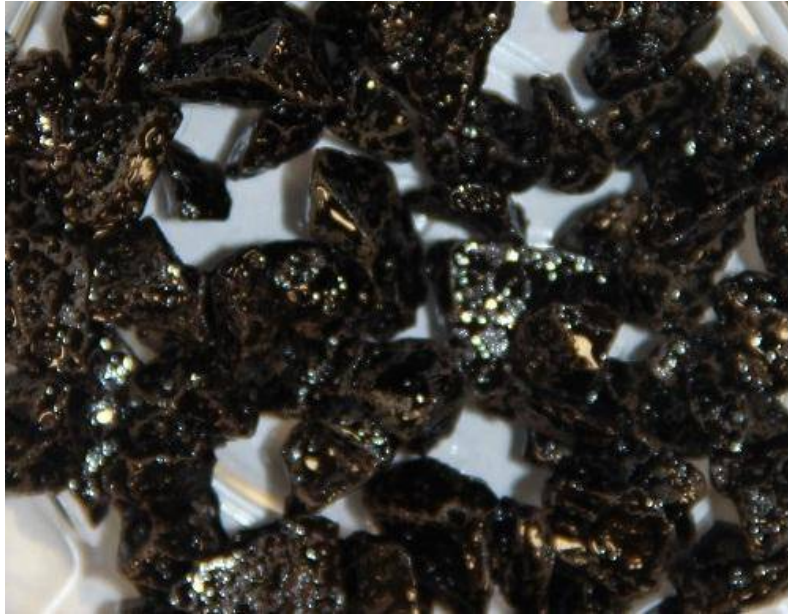
%1 İAP katkılı bitüm

Resim 4.1. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



%2 İAP katkılı bitüm

Resim 4.2. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



%3 İAP katkılı bitüm

Resim 4.3. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



%5 İAP katkılı bitüm

Resim 4.4. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



%10 İAP katkılı bitüm

Resim 4.5. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



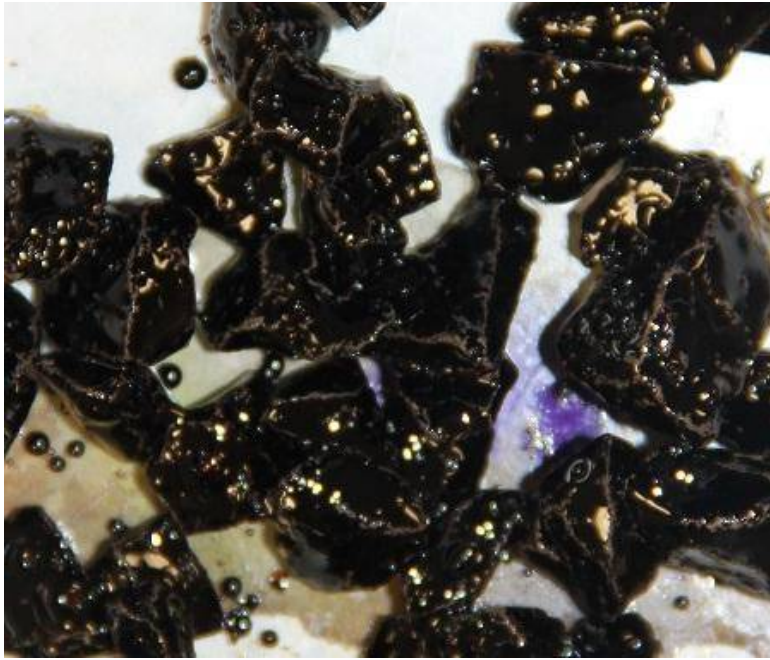
%1 VP katkılı bitüm

Resim 4.6. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



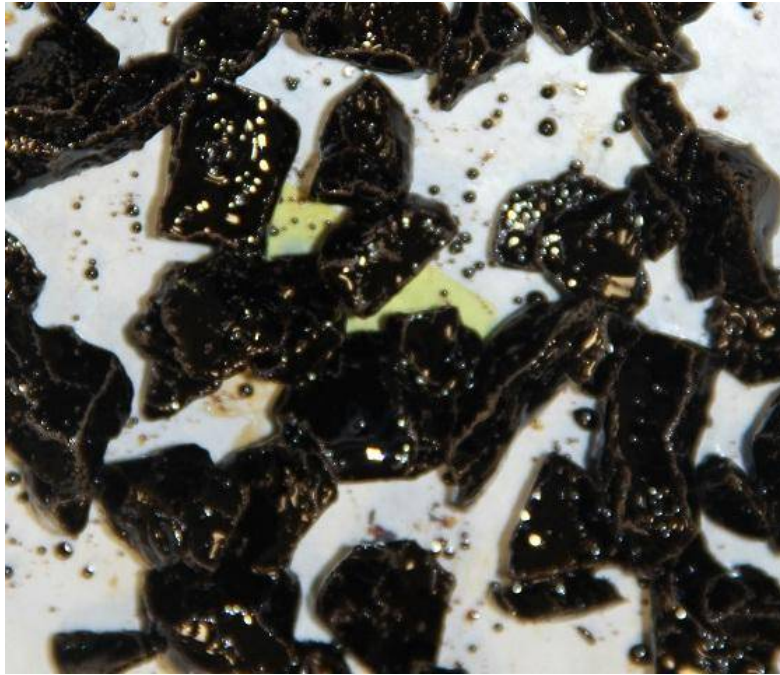
%2 VP katkılı bitüm

Resim 4.7. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



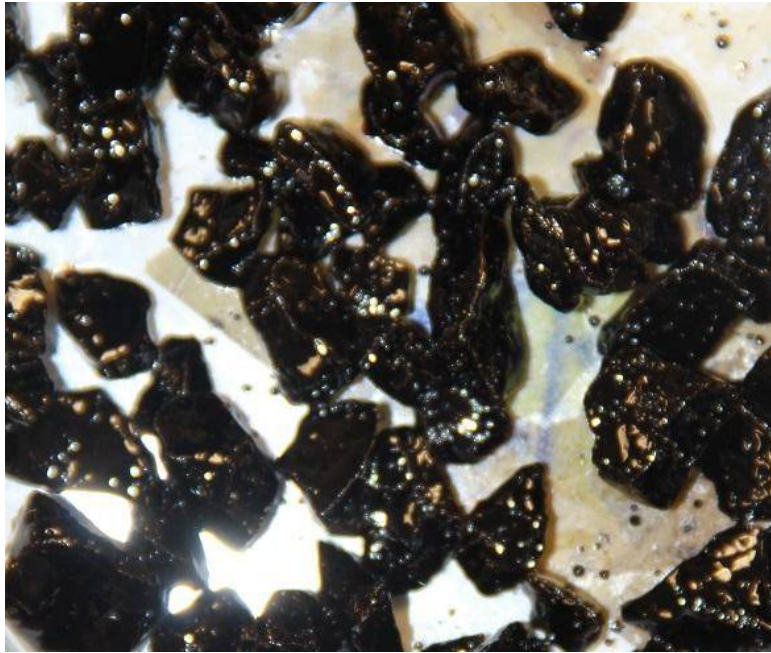
%3 VP katkılı bitüm

Resim 4.8. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



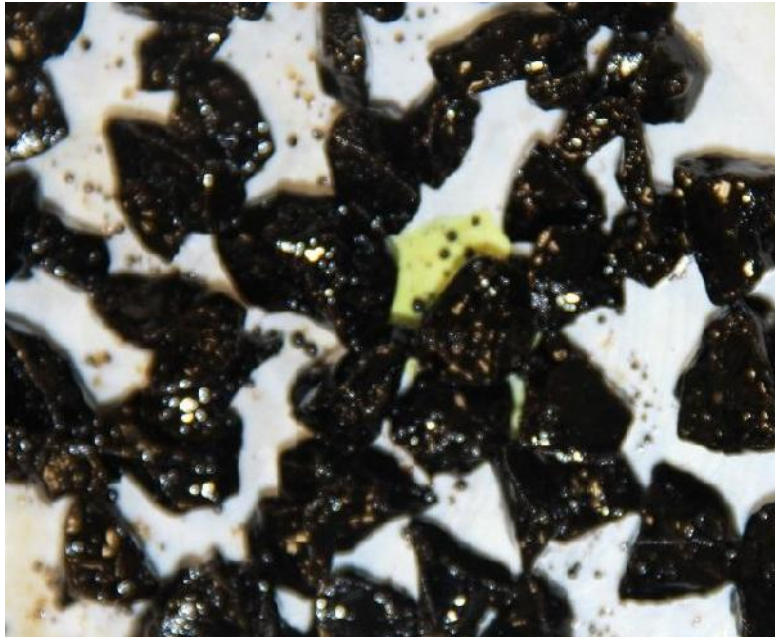
%5 VP katkılı bitüm

Resim 4.9. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-4 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm)



Orijinal Bitüm



%10 VP katkılı bitüm

Resim 4.10. Orijinal ve İAP katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK- 5 Viskozite test cihazı



Resim 5.1. Brookfield DV III Ultra Marka programlanabilir viskozimetre



Resim 5.2. Brookfield DV III Ultra Marka programlanabilir viskozimetre

EK- 6 Katkıkı maddeleri



Resim 6.1. İnce Akışkan Poliöl (İAP)



Resim 6.2. Viskoz Poliöl (VP)

EK- 7 Agregada ve bitüm özgül ağırlık tayini

Agregada özgül ağırlık tayini

Çalışmada agregada özgül ağırlıkları deneysel olarak aşağıda belirtildiği şekilde belirlenmiştir.

Kaba agreganın özgül ağırlık tayini

- Kaba agregadan karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde ve karışımda bulunan maksimum dane boyutuna göre belirli miktarda hazırlanır.
- Numune yıkanır, tepsiye konur ve 24 saat suda bekletilir.
- 24 saatin sonunda numune su emici özellikteki bez üzerine yayılır. Numune, daneler üzerinde gözle görülebilecek su filmi kalmayınca kadar kurularak doygun-yüzey kuru hale getirilir. Bu aşamada danelerin gözeneklerindeki suyun buharlaşmamasına dikkat edilmelidir.
- Doygun-yüzey kuru hale gelmiş numune tartılır ve sonuç kaydedilir (B).
- Tartımdan sonra numune hemen tel sepete koyulur ve $25\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki ve $977\pm2 \text{ kg/m}^3$ yoğunluktaki suya daldırılır. Su içerisindeki tel sepet sallanarak agregada daneleri arasına suyun dolması sağlandıktan sonra tartım yapılır ve ölçüm kaydedilir (C).
- Daha sonra numune bir tepsiye boşaltılır ve $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur. Kurutma işleminden sonra numune oda sıcaklığında soğutulur. Kuru hale gelen numune tartılır ve ölçüm kaydedilir (A).

Elde edilen ölçüm değerleri ile kaba agregaya ait özgül ağırlıklar ve absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller ile hesaplanır;

- Hacim Özgöl Ağırlığı = $\frac{A}{B-C}$
- Yaş Hacim Özgöl Ağırlığı = $\frac{B}{B-C}$
- Zahiri Özgöl Ağırlık = $\frac{A}{A-C}$
- Absorpsiyon (%) = $\frac{B-A}{A} \times 100$
- Çalışmada Tip 1 gradasyonuna ait ortalama değerler kullanılmıştır. Tip 1 gradasyonunda maksimum dane boyutu $1/2$ " olduğundan ölçümler 2 kg kaba agrega ile yukarıda belirtilen koşullarda yapılmıştır. Kaba agregaya ait hacim ve zahiri özgöl ağırlıklar elde edilen ölçüm değerleri ile hesaplanmıştır.

Çizelge 7.1. Kaba agregaya ait özgöl ağırlık

Kaba Agrega				
A	Kuru Ağırlık (gr)	1223	Zahiri Özgöl Ağırlık	Hacim Özgöl Ağırlık
B	Sudaki Ağırlık(gr)	771,5	2,709	2,643
C	Doygun yüzey ağırlık(gr)	1234		

İnce agreganın özgöl ağırlık tayini

- Karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde yaklaşık 1000 gr numune alınır.
- Numune, 200 no.'lu elekten yıkanıp bir tepsiye alınır. Tepsi, numune seviyesini geçecek kadar su ile doldurulur. Numune bu şekilde 24 saat suda bekletilir.
- 24 saatin sonunda numunede kayıp oluşturmadan tepsideki su süzülür. Numune, absorpsif olmayan düz bir yüzeye yayılır ve doymuş- yüzey kuru hale getirmek üzere sıcak hava uygulayarak sürekli karıştırılır. Numune karıştırılırken serbest dökülebilir hale gelene kadar karıştırma işlemine devam edilir.

EK-7 (Devam) Agrega ve bitüm özgül ağırlık tayini

- Doygun-yüzey kuru hale gelmiş numuneden yaklaşık 500 gr alınır, piknometre içine konur ve tartılır. Tartım kaydedilir (C).
- Piknometreye numune seviyesini geçecek kadar su konur ve çalkalanarak hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Daha sonra piknometreye işaret çizgisine kadar su ilave edilerek $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosuna yerleştirilir. Piknometre ve içindeki malzemenin 25°C ulaşması sağlandıktan sonra su banyosundan çıkarılıp piknometre içindeki su seviyesi kontrol edilir. Hemen kurulanır ve tartılır. Tartım kaydedilir (D).
- Numune piknometreden bir kaba alınıp $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Kurutma işleminden sonra numune oda sıcaklığında soğutulur ve tartılır. Tartım kaydedilir (E).
- Elde edilen ölçüm değerleri ile ince agregaya ait özgül ağırlıklar ve absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller ile hesaplanır;

- Hacim Özgül Ağırlığı
$$= \frac{E}{B+C-A-D}$$

- Yaş Hacim Özgül Ağırlık
$$= \frac{C-A}{B+C-A-D}$$

- Zahiri Özgül Ağırlık
$$= \frac{E}{B+E-D}$$

- Absorpsiyon (%)
$$= \frac{C-A-E}{E} \times 100$$

A: Piknometre ağırlığı, gr

B: 25°C 'deki su dolu piknometre ağırlığı, gr

EK-7 (Devam) Agregaya ve bitüm özgül ağırlık tayini

Çizelge 7.2. İnce agregaya ait özgül ağırlık

İnce Agregaya				
A	Piknometre (gr)	141	Zahiri Özgül Ağırlık	Hacim Özgül Ağırlık
B	Piknometre + Su (gr)	630	2,778	2,732
C	Piknometre + Numune (gr)	633		
D	Piknometre + Numune + Su (gr)	943		
E	Numune Kuru Ağırlığı (gr)	489		

Fillerin özgül ağırlık tayini

- Özgül ağırlık şişesi ve kapağı tartılır, tartım kaydedilir (A).
- Şişe, damıtık veya kaynatılıp soğutulmuş su ile ağzına kadar doldurulur, $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir, kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve hemen tartılır. Tartım kaydedilir (B).
- Filler, $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde 4 saat kurutulup ardından oda sıcaklığında soğutulur. Özgül ağırlık şişesi ve kapağı da kurutulur. Filler, şişenin 1/3'ü dolacak şekilde şişeye boşaltılır, şişenin kapağı kapatılıp tartılır. Tartım kaydedilir (C).
- Ardından özgül ağırlık şişesi yarısına kadar su ile doldurulur, kapağı kapatılıp içindeki hava çıkartılır (birkaç kez yavaşça şişeyi tezgaha vurup en az 5 dakika bir vakum desikatör içinde veya su trombu ile düşürülmüş basınca maruz bırakılarak). Bu işleme hava kabarcığı kalmayana kadar devam edilir.
- Daha sonra özgül ağırlık şişesi tamamen su ile doldurulup $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir. Kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve tartılır. Tartım kaydedilir (D).
- Elde edilen ölçüm değerleri ile fillere ait zahiri özgül ağırlık aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\bullet \text{ Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)}$$

EK-7 (Devam) Agrega ve bitüm özgül ağırlık tayini

Çizelge 7.3. Fillere ait özgül ağırlık

Filler			
A	Piknometre (gr)	32,295	Zahiri Özgül Ağırlık
B	Piknometre + Su (gr)	124,935	2,823
C	Piknometre +Numune (gr)	62,295	
D	Piknometre +Numune + Su(gr)	144,31	

Bitümün özgül ağırlık tayini

- Özgül ağırlık şişesi ve kapağı tartılır, tartım kaydedilir (A).
- Şişe, damıtık veya kaynatılıp soğutulmuş su ile ağzına kadar doldurulur, $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir, kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve hemen tartılır. Tartım kaydedilir (B).
- Bitüm, etüvde ısıtılarak akıcı hale getirilir. Özgül ağırlık şişesi ve kapağı kurutulur. Bitüm, şişenin 1/3'ü dolacak şekilde şişeye boşaltılır, şişenin kapağı kapatılıp tartılır. Tartım kaydedilir (C).
- Ardından özgül ağırlık şişesi yarısına kadar su ile doldurulur, kapağı kapatılıp içindeki hava çıkartılır (birkaç kez yavaşça şişeyi tezgaha vurup en az 5 dakika bir vakum desikatör içinde veya su trombu ile düşürülmüş basınca maruz bırakılarak). Bu işleme hava kabarcığı kalmayana kadar devam edilir.
- Daha sonra özgül ağırlık şişesi tamamen su ile doldurulup $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir. Kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve tartılır. Tartım kaydedilir (D).
- Elde edilen ölçüm değerleri ile bitüme ait özgül ağırlık aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)}$$

EK-7 (Devam) Agregat ve bitüm özgül ağırlık tayini

Çizelge 7.4. Bitüme ait özgül ağırlık

Filler			
A	Piknometre (gr)	23,254	Zahiri Özgül Ağırlık
B	Piknometre + Su (gr)	124,836	1,02
C	Piknometre +Numune (gr)	69,919	
D	Piknometre +Numune + Su(gr)	126,102	

Filler			
A	Piknometre (gr)	28,719	Zahiri Özgül Ağırlık
B	Piknometre + Su (gr)	135,735	1,023
C	Piknometre +Numune (gr)	82,426	
D	Piknometre +Numune + Su(gr)	136,212	

EK-8 Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri

Çizelge 8.1. Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri

Boy	Katsa	Boy	Katsa	Boy	Katsa	Boy	Katsa
51	1,46	55,3	1,263	59,6	1,112	63,9	0,99
51,1	1,455	55,4	1,259	59,7	1,109	64	0,988
51,2	1,45	55,5	1,254	59,8	1,106	64,1	0,985
51,3	1,445	55,6	1,25	59,9	1,103	64,2	0,983
51,4	1,44	55,7	1,246	60	1,099	64,3	0,98
51,5	1,435	55,8	1,243	60,1	1,096	64,4	0,978
51,6	1,43	55,9	1,239	60,2	1,093	64,5	0,975
51,7	1,425	56	1,235	60,3	1,09	64,6	0,973
51,8	1,42	56,1	1,231	60,4	1,087	64,7	0,97
51,9	1,415	56,2	1,228	60,5	1,084	64,8	0,968
52	1,41	56,3	1,224	60,6	1,081	65	0,963
52,1	1,405	56,4	1,22	60,7	1,078	65,1	0,96
52,2	1,4	56,5	1,216	60,8	1,074	65,2	0,958
52,3	1,395	56,6	1,213	60,9	1,071	65,3	0,956
52,4	1,39	56,7	1,209	61	1,068	65,4	0,954
52,5	1,386	56,8	1,205	61,1	1,065	65,5	0,953
52,6	1,381	56,9	1,201	61,2	1,062	65,6	0,951
52,7	1,377	57	1,198	61,3	1,059	65,7	0,949
52,8	1,373	57,1	1,194	61,4	1,056	65,8	0,947
52,9	1,368	57,2	1,19	61,5	1,053	65,9	0,945
53	1,364	57,3	1,187	61,6	1,049	66	0,943
53,1	1,359	57,4	1,184	61,7	1,046	66,1	0,941
53,2	1,355	57,5	1,181	61,8	1,043	66,2	0,939
53,3	1,351	57,6	1,178	61,9	1,04	66,3	0,938
53,4	1,346	57,7	1,174	62	1,038	66,4	0,936
53,5	1,342	57,8	1,171	62,1	1,035	66,5	0,934
53,6	1,338	57,9	1,168	62,2	1,033	66,6	0,932
53,7	1,333	58	1,165	62,3	1,03	66,7	0,93
53,8	1,329	58,1	1,162	62,4	1,028	66,8	0,928
53,9	1,324	58,2	1,159	62,5	1,025	66,9	0,925
54	1,32	58,3	1,156	62,6	1,023	67	0,923
54,1	1,316	58,4	1,153	62,7	1,02	67,1	0,92
54,2	1,311	58,5	1,149	62,8	1,018	67,2	0,918
54,3	1,307	58,6	1,146	62,9	1,015	67,3	0,915
54,4	1,303	58,7	1,143	63	1,013	67,4	0,913
54,5	1,298	58,8	1,137	63,1	1,01	67,5	0,91
54,6	1,294	58,9	1,134	63,2	1,008	67,6	0,908
54,7	1,289	59	1,131	63,3	1,005	67,7	0,905
54,8	1,285	59,1	1,128	63,4	1,003	67,8	0,903
54,9	1,281	59,2	1,124	63,5	1	67,9	0,9
55	1,276	59,3	1,121	63,6	0,998	68	0,898
55,1	1,272	59,4	1,118	63,7	0,995	68,1	0,895
55,2	1,268	59,5	1,115	63,8	0,993	68,2	0,893

EK-9 Briket hacmine bağılı düzeltme faktörleri

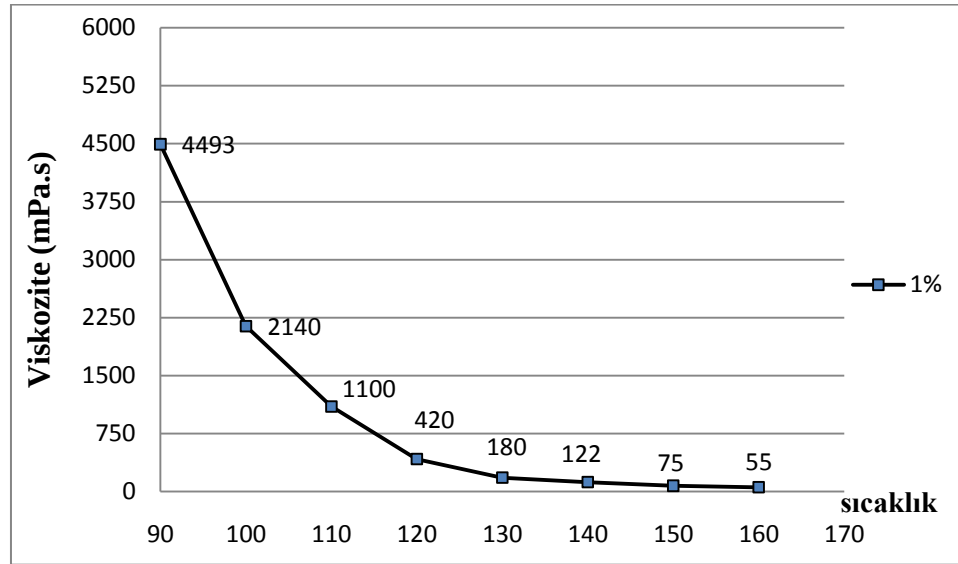
Çizelge 9.1. Briket hacmine bağılı düzeltme faktörleri

Briket Hacmi (cm3)	Düzeltilme Faktörü
277-289	3,33
290-301	3,03
302-316	2,78
317-328	2,5
329-340	2,27
341-353	2,08
354-367	1,92
368-379	1,79
380-392	1,67
393-405	1,56
406-420	1,47
421-431	1,39
432-443	1,32
444-456	1,25
457-470	1,19
471-482	1,14
483-495	1,09
496-508	1,04
509-522	1,00
523-535	0,96
536-546	0,93
547-559	0,89
560-573	0,86
574-585	0,83
586-598	0,81
599-610	0,78
611-625	0,76

EK-10A İnce akışkan poliol (İAP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.1. %1 İAP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4493	4480	4493	4487	4500	4493
100	2133	2147	2140	2133	2153	2140
110	1100	1107	1100	1113,3	1120	1100
120	420	426,7	420	420	426,7	420
130	173,3	180	173,3	180	180	180
140	120	126,7	126,7	120	126,7	122
150	73,3	73,3	80	66,7	73,3	75
160	60	53,3	53,3	60	60	55

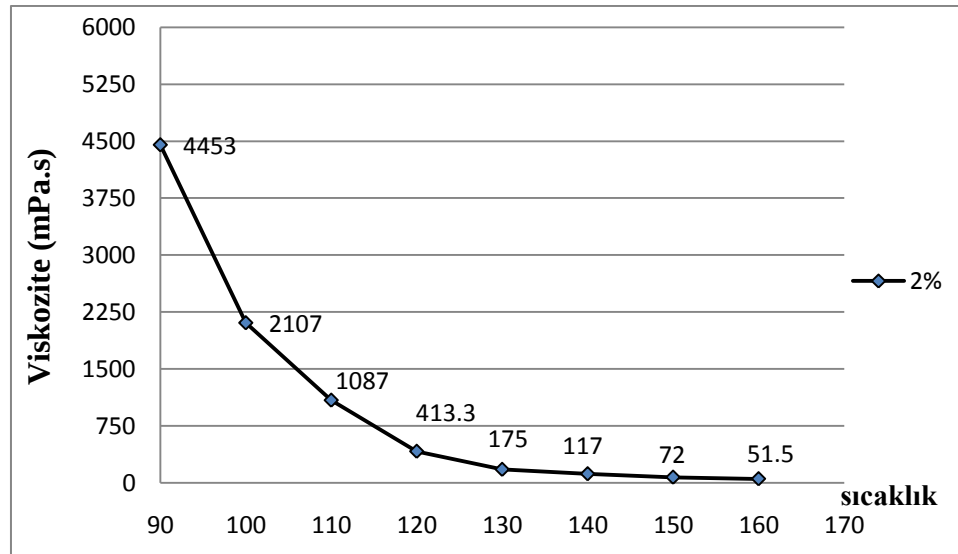


Şekil 10.1. %1 İAP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) İnce akışkan poliol (İAP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.2. %2 İAP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4453	4447	4460	4447	4453	4453
100	2093	2100	2113	2120	2113	2108,5
110	1087	1093	1093	1087	1100	1087
120	406,7	413,3	413,3	420	406,7	413,3
130	180	160	166,7	173,3	173,3	175
140	106,7	120	113,3	120	113,3	117
150	66,7	73,3	60	66,7	73,3	71,1
160	46,7	40	53,33	53,33	46,7	51,4

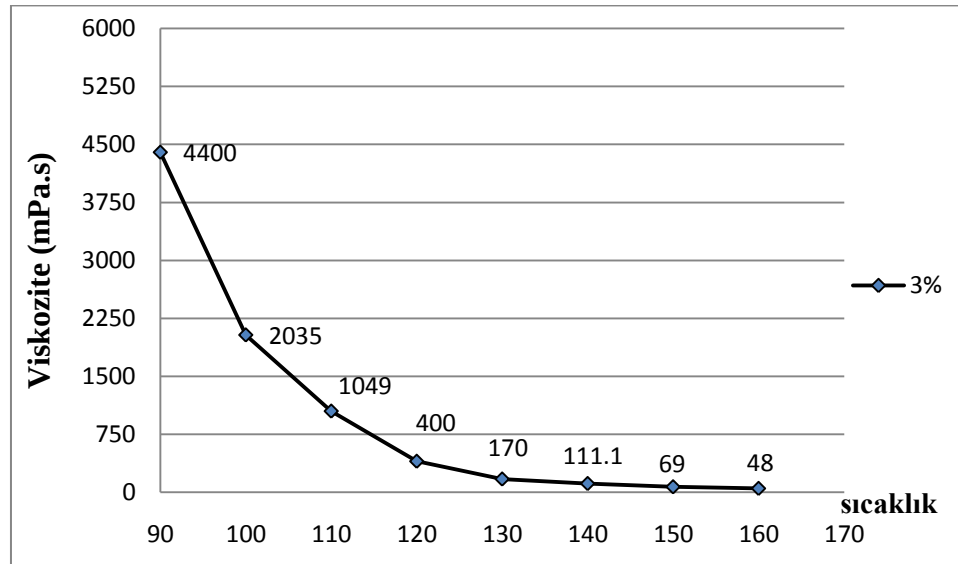


Şekil 10.2. %2 İAP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) İnce akışkan poliol (İAP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.3. %3 İAP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4413	4407	4400	4400	4420	4400
100	2053	2046,7	2040	2033	2033	2035
110	1047	1047	1053	1053	1060	1049
120	406,7	393,3	400	406,7	413,3	400
130	160	153,3	166,7	166,7	173,3	169
140	106,7	100	106,7	113,3	113,3	111,1
150	60	66,7	66,7	73,3	60	69
160	40	33,3	46,7	46,7	53,3	48,9

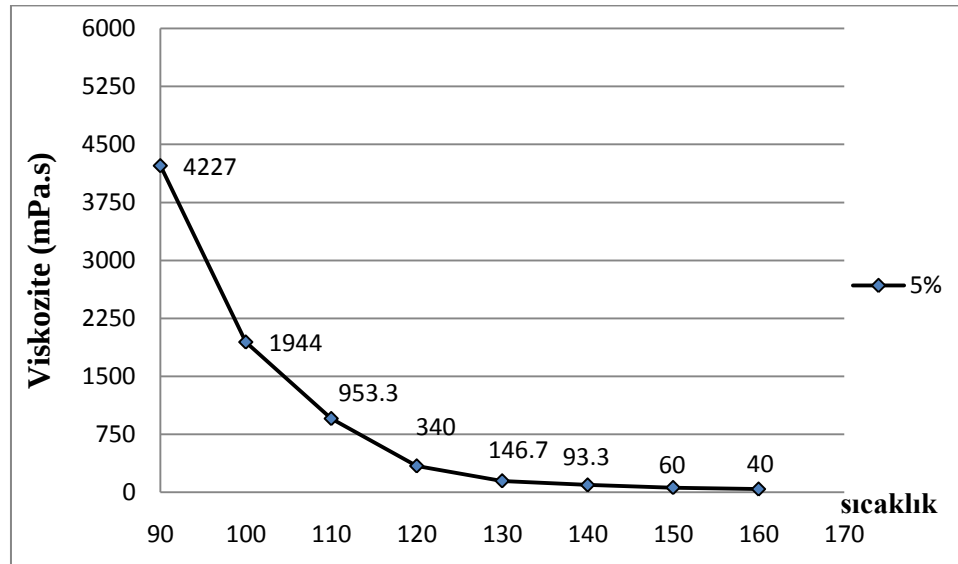


Şekil 10.3. %3 İAP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) İnce akışkan poliol (İAP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.4. %5 İAP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4233	4227	4233	4220	4220	4227
100	1940	1947	1940	1947	1953	1940
110	960	953,3	953,3	960	966,7	953,3
120	340	326,7	333,3	326,7	340	340
130	153,3	146,7	146,7	140	153,3	146,7
140	93,3	100	106,7	93,3	100	93,3
150	60	66,7	66,7	60	60	60
160	40	40	46,7	40	46,7	40

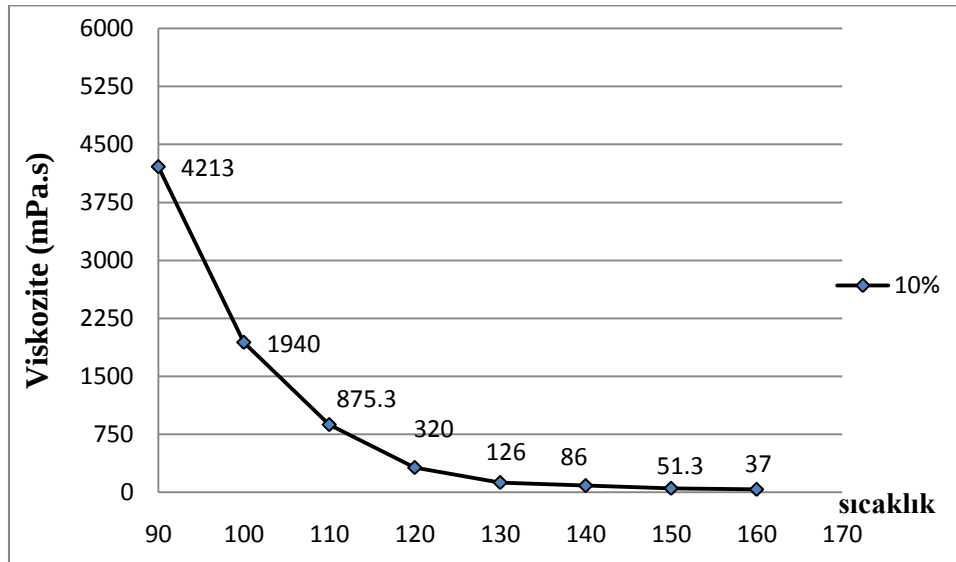


Şekil 10.4. %5 İAP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) İnce akışkan poliol (İAP) katkıli bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

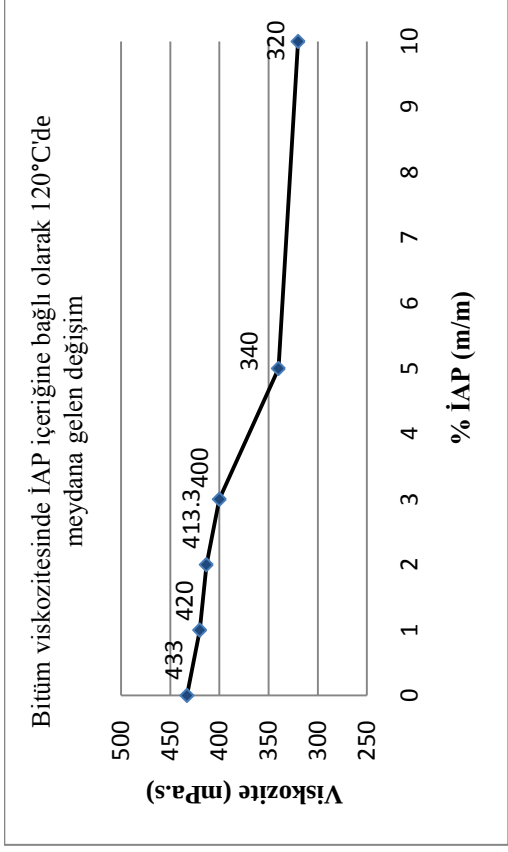
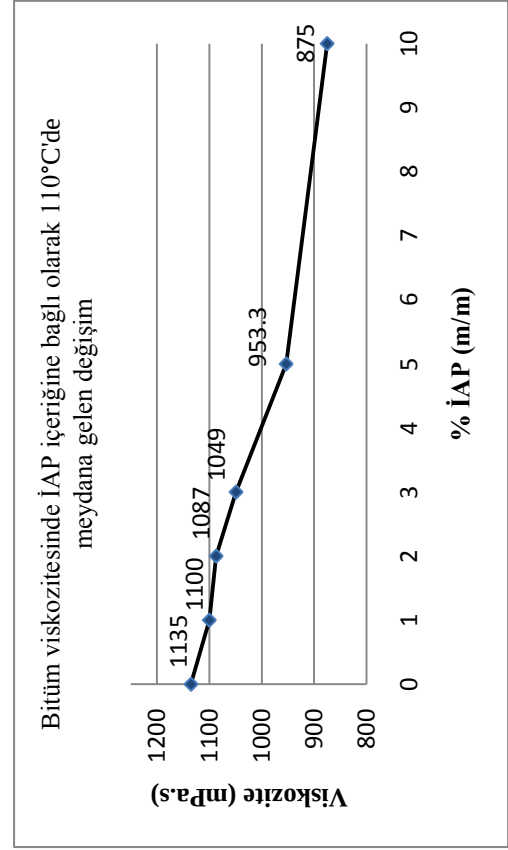
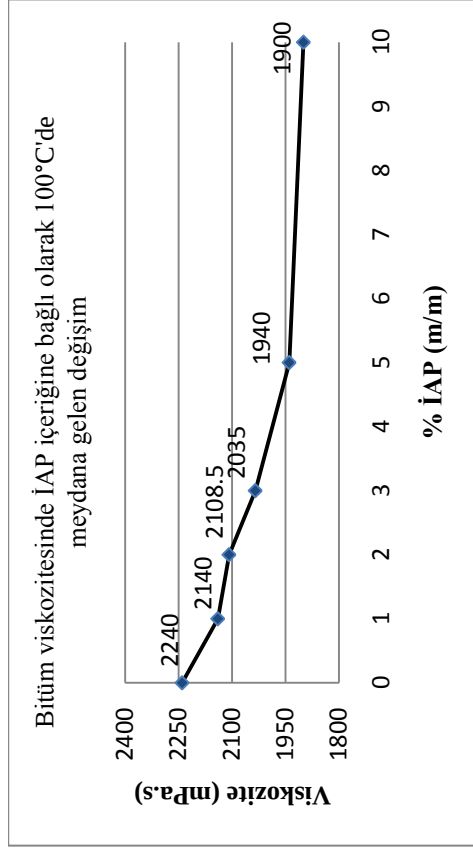
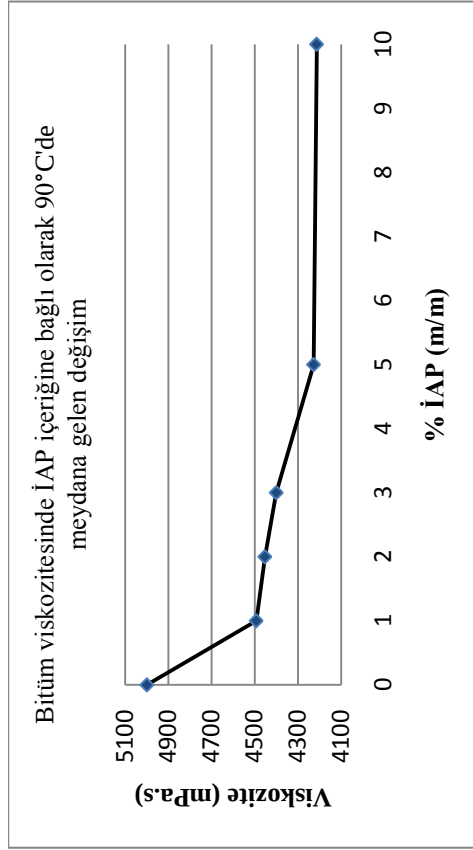
Çizelge 10.5. %10 İAP katkıli bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4220	4213	4207	4213	4220	4213
100	1893	1907	1900	1913	1893	1900
110	866,7	873,3	880	886,7	866,7	875
120	320	313,3	320	307,6	326,7	320
130	120	113,3	126,7	120	133,3	126
140	93,3	80	86,7	73,3	93,3	86
150	60	53,3	46,7	60	46,7	53
160	33,3	46,7	40	33,3	40	38,5

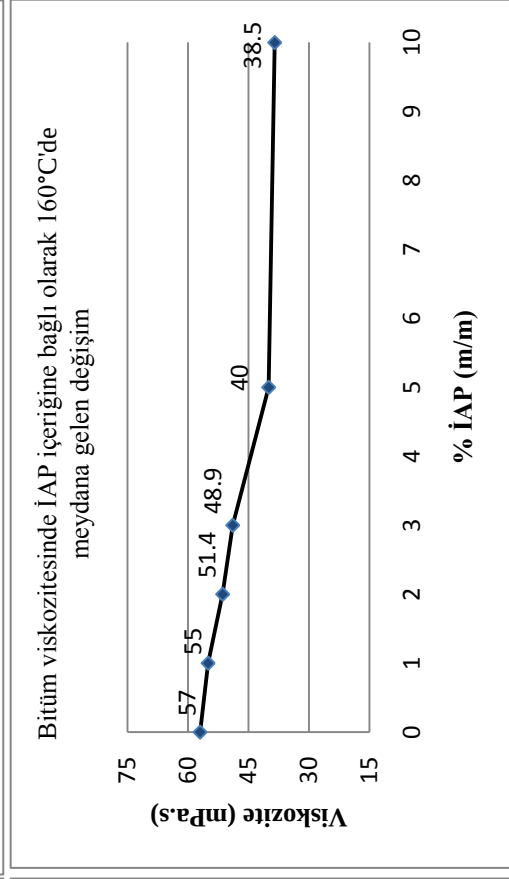
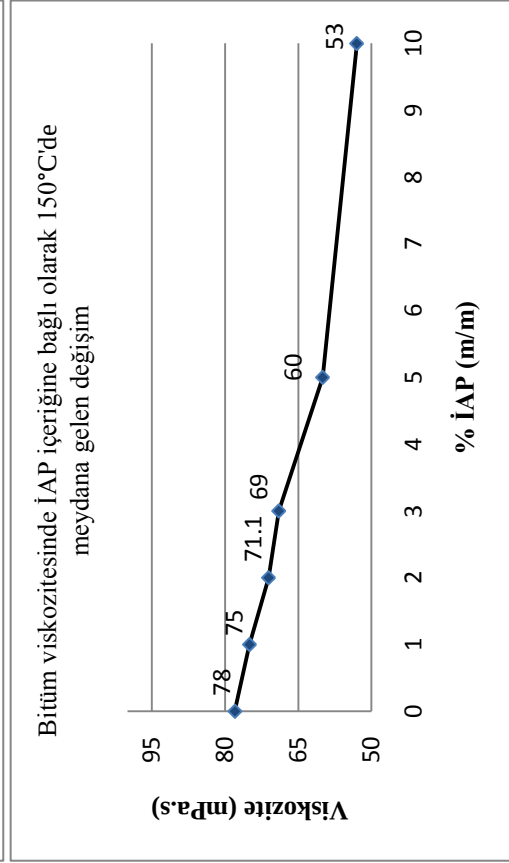
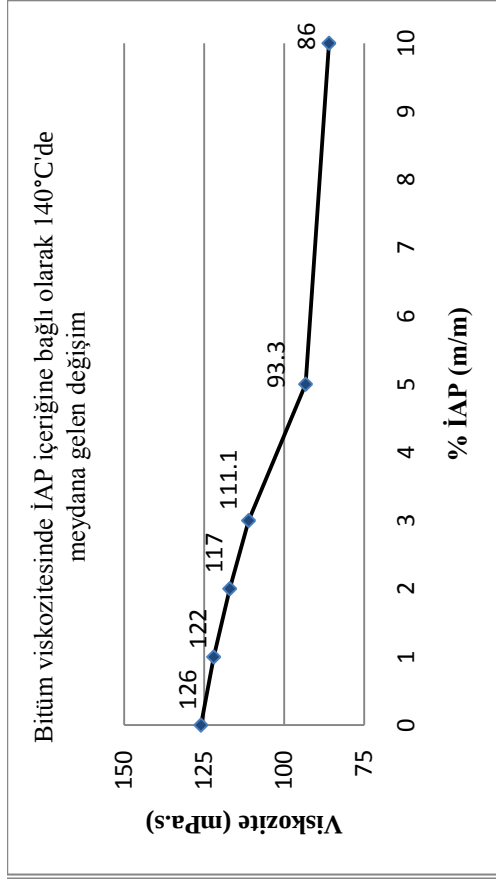
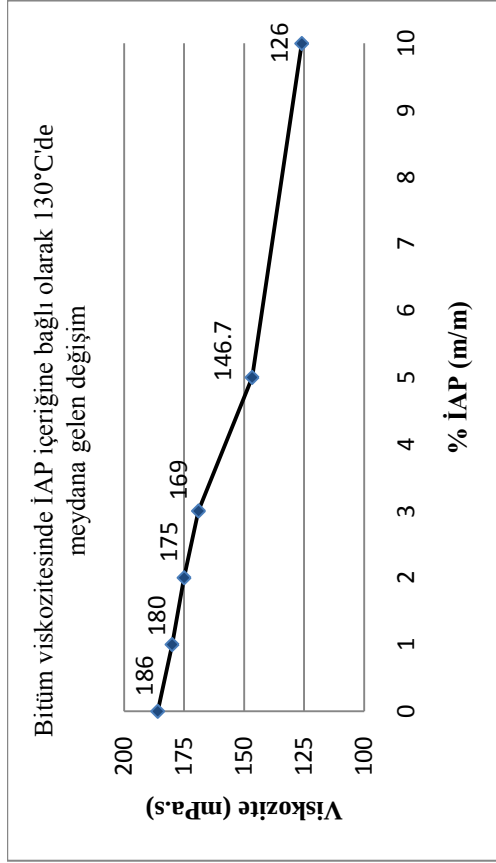


Şekil 10.5. %10 İAP katkıli bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10B İAP'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



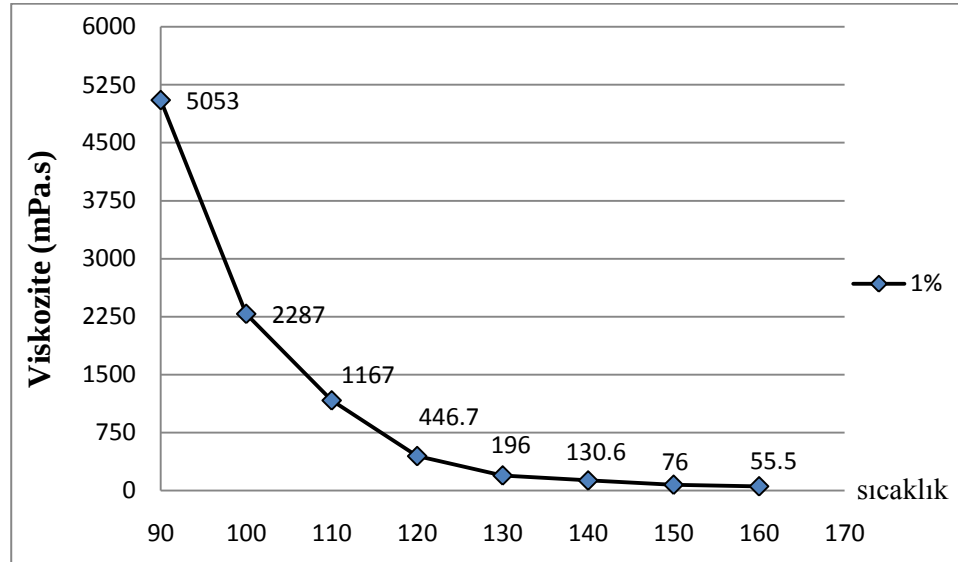
EK-10B (Devam) İAP'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-11A Viskoz poliöl (VP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.1. %1 VP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	5047	5053	5040	5053	5060	5053
100	2280	2293	2287	2280	2293	2287
110	1167	1153	1160	1167	1153	1167
120	433,3	440	446,7	440	453,3	446,7
130	193,3	200	207,6	193,3	186,7	196
140	133,3	126,7	120	133,3	140	130,6
150	73,3	66,7	80	86,7	73,3	76
160	53,3	60	46,7	53,3	66,7	55,5

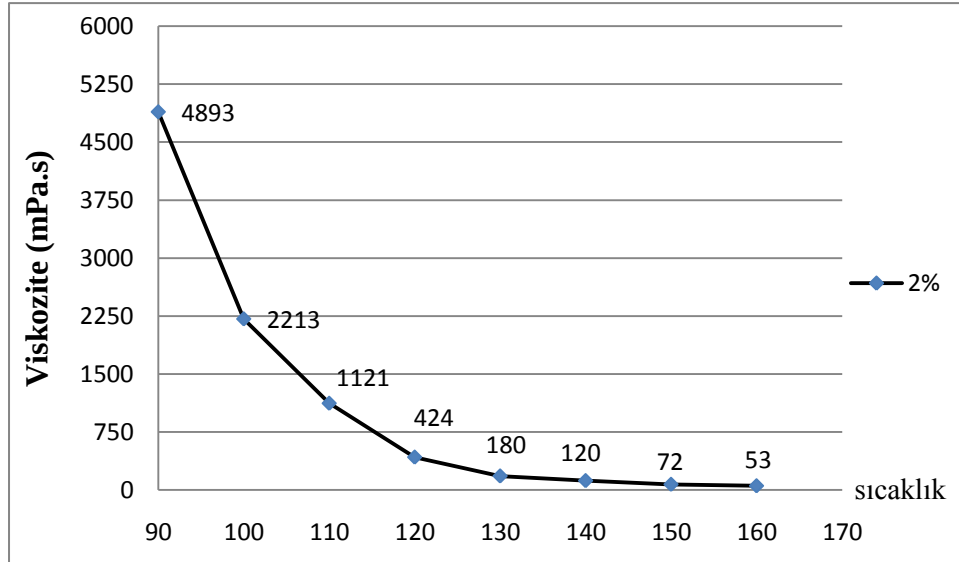


Şekil 11.1. %1 VP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Viskoz poliol (VP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.2. %2 VP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4886	4893	4900	4886	4893	4893
100	2207	2220	2213	2207	2213	2213
110	1120	1113	1126	1120	1126	1121
120	420	426,7	413,3	433,3	426,7	424
130	173,3	186,7	173,3	180	186,7	180
140	120	126,7	113,3	126,7	113,3	120
150	73,3	66,7	73,3	80	66,7	72
160	53,3	46,7	60	46,7	53,3	53

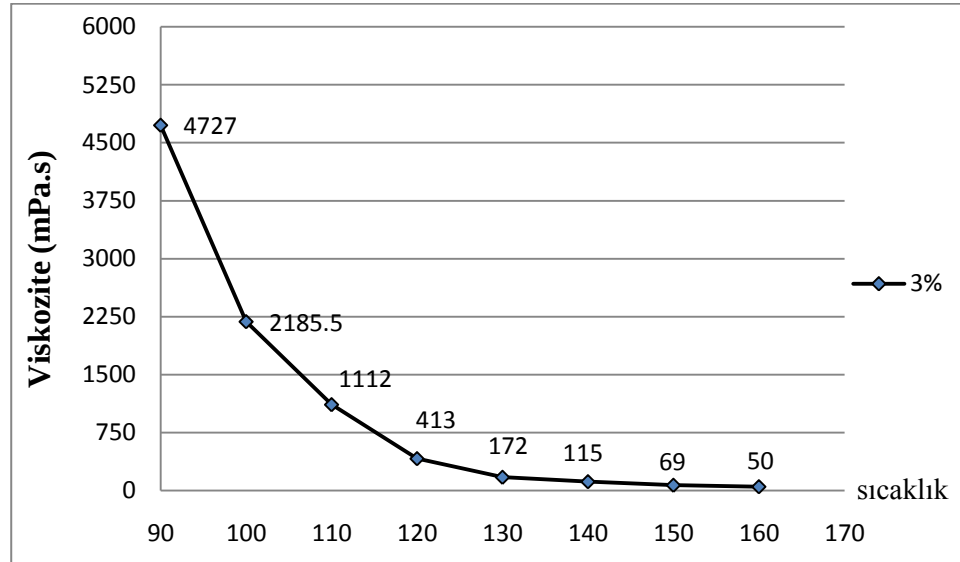


Şekil 11.2. %2 VP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Viskoz poliol (VP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.3. %3 VP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4727	2733	4720	4733	4727	4727
100	2180	2187	2193	2187	2180	2185,5
110	1113	1107	1120	1113	1107	1112
120	420	413,3	407,6	420	413,3	413
130	166,7	173,3	180	173,3	166,7	172
140	113,3	107,6	120	113,3	120	115
150	66,7	73,3	66,7	80	60	69
160	53,3	46,7	40	53,3	60	50

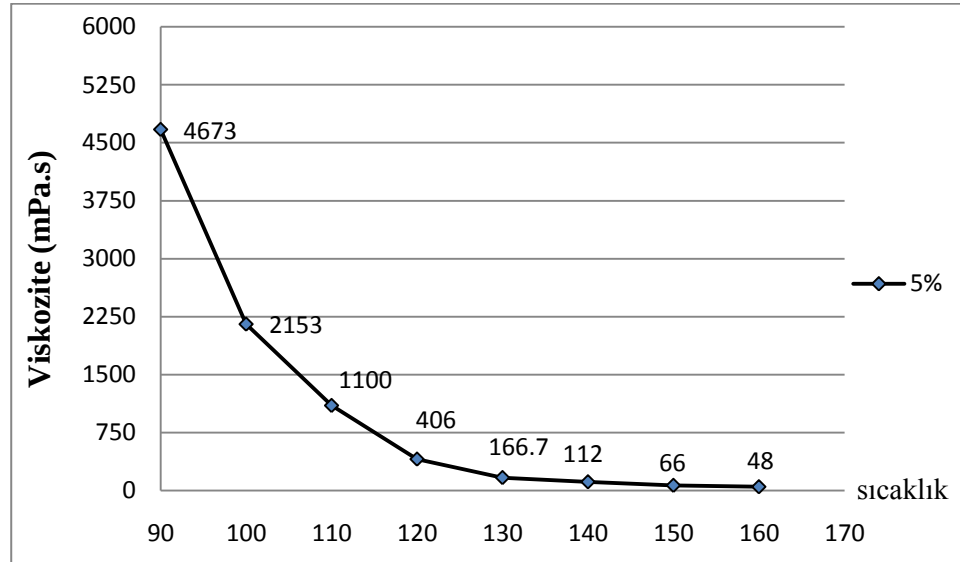


Şekil 11.3. %3 VP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Viskoz poliol (VP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.4. %5 VP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4667	4673	4680	4673	4667	4673
100	2146	2140	2153	2160	2153	2153
110	1107	1113	1093	1100	1093	1100
120	400	406,7	413,3	406,7	413,3	406
130	160	173,3	166,7	160	166,7	166,7
140	107,6	113,3	120	113,3	107,6	112
150	66,7	60	73,3	60	66,7	66
160	46,7	53,3	40	46,7	53,3	48

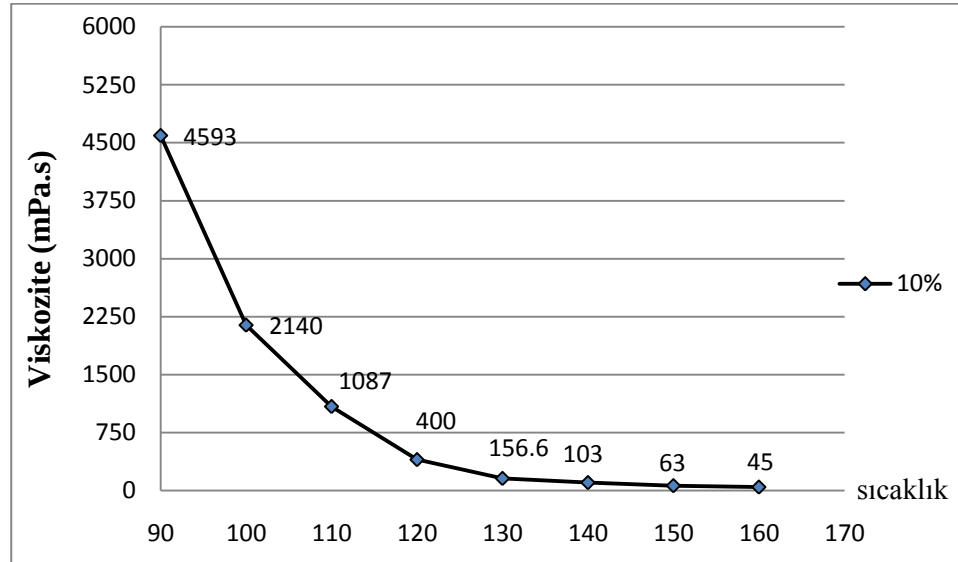


Şekil 11.4. %5 VP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Viskoz poliol (VP) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

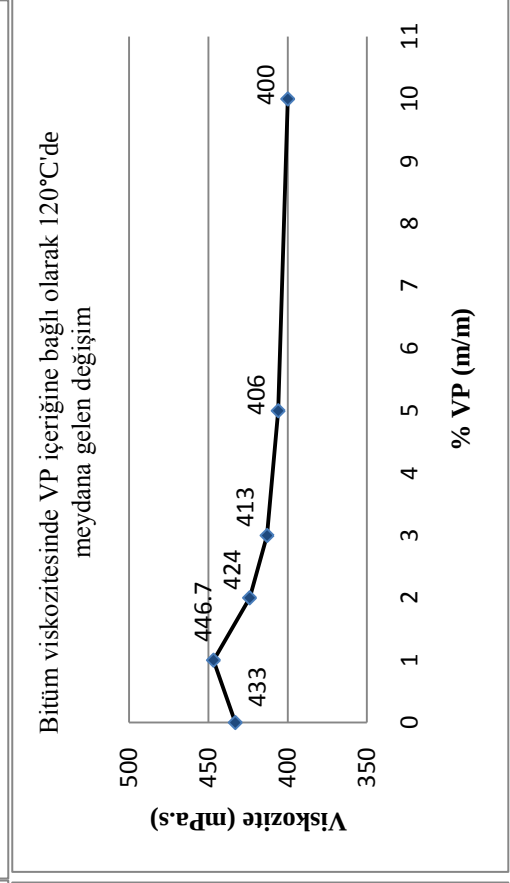
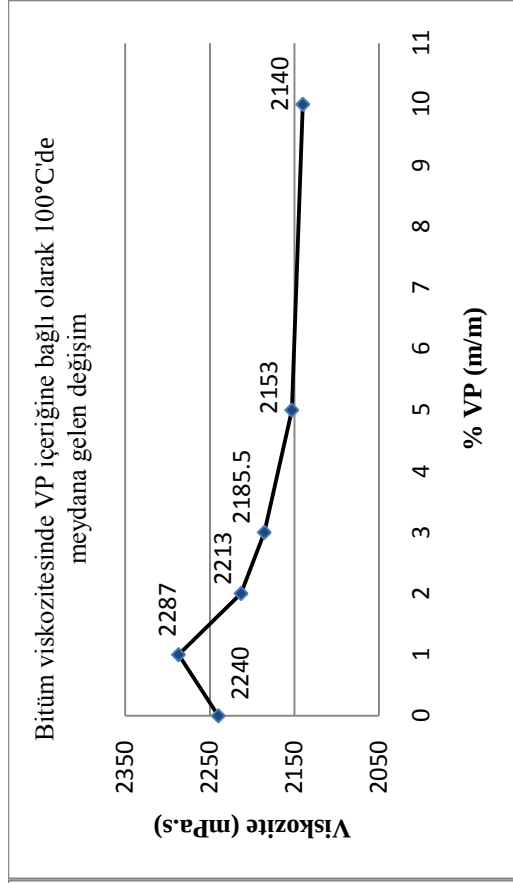
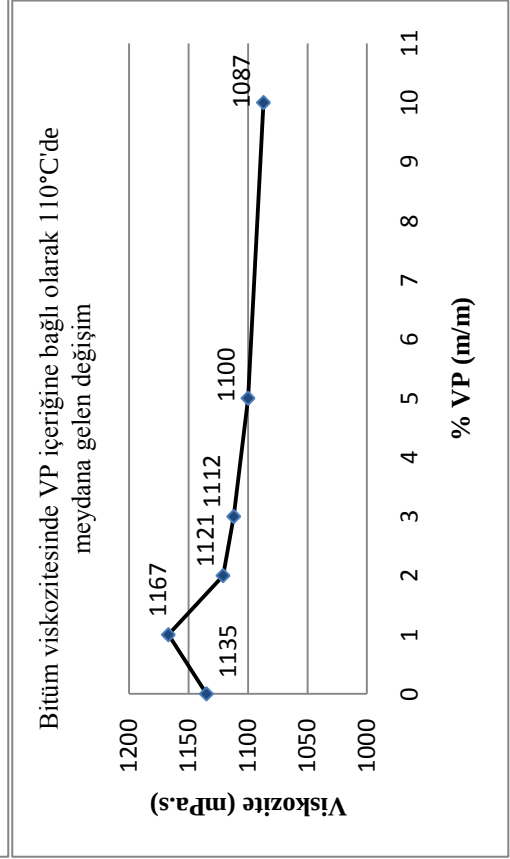
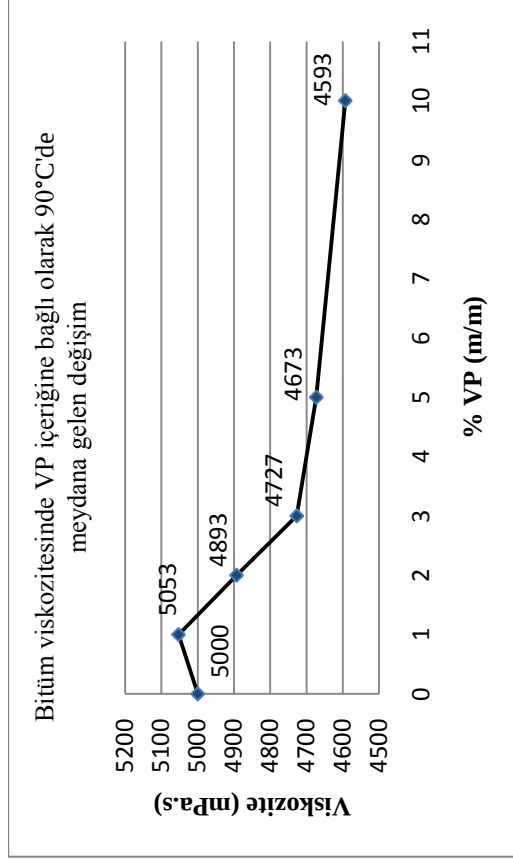
Çizelge 11.5. %10 VP katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
90	4586	4593	4600	4593	4580	4593
100	2146	2153	2140	2133	2140	2140
110	1080	1093	1087	1100	1087	1087
120	406,7	400	393,3	406,7	400	400
130	160	153,3	160	153,3	166,7	156,6
140	93,3	100	93,3	106,7	113,3	103
150	53,3	60	66,7	60	66,7	63
160	46,7	53,3	40	46,7	40	45

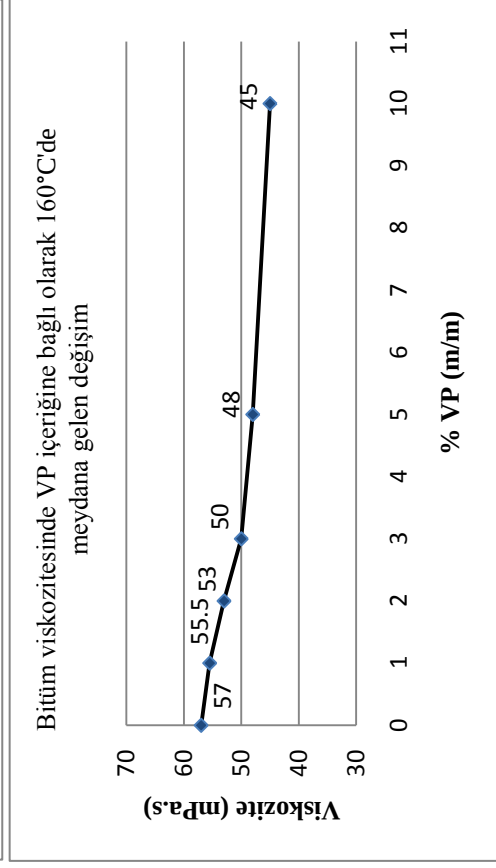
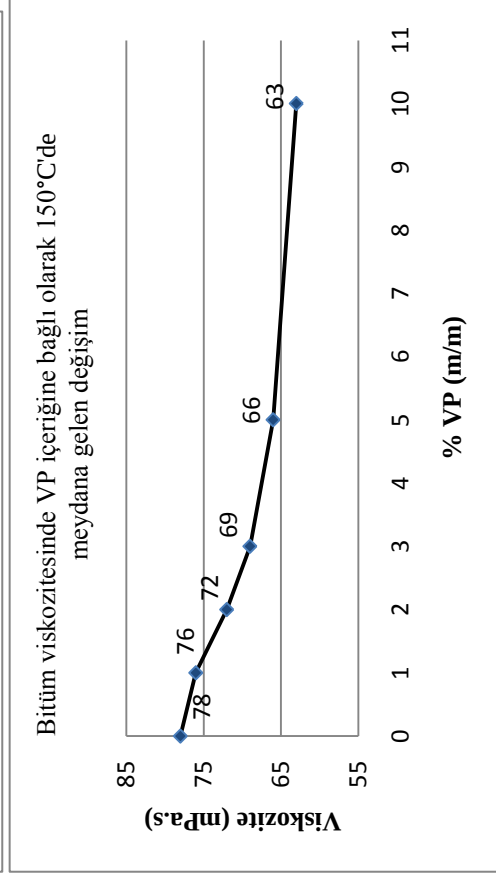
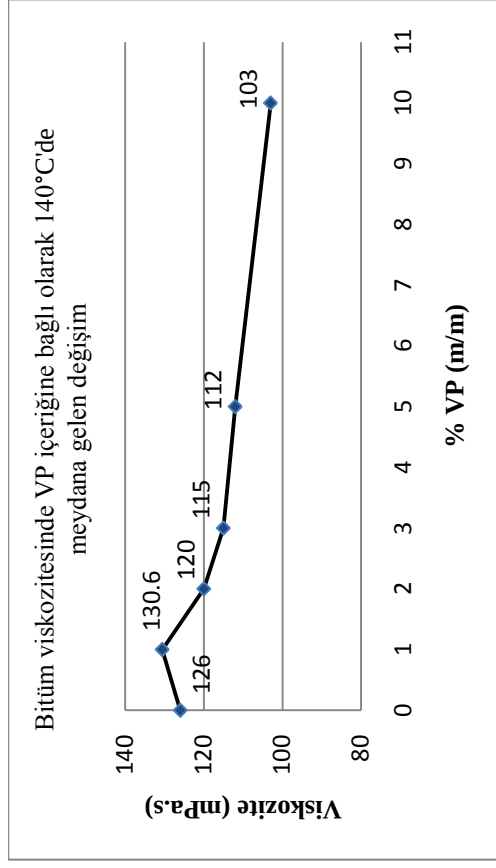
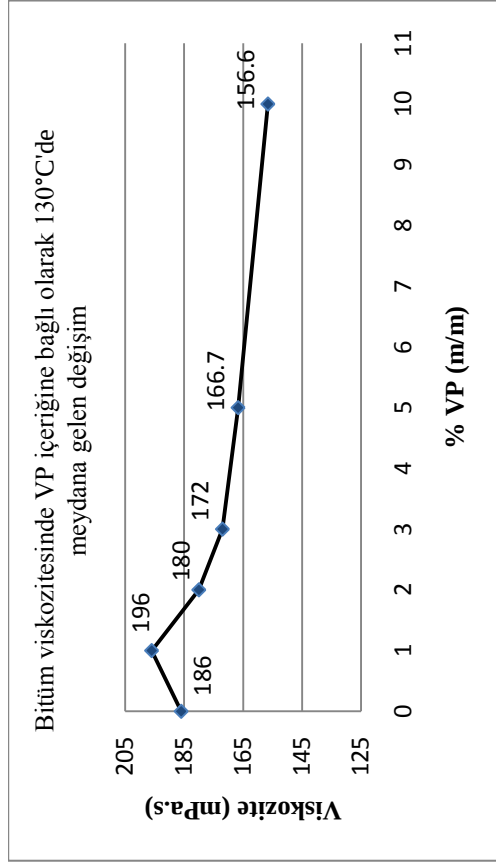


Şekil 11.5. %10 VP katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11B VP'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-11B (Devam) VP'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-12 Marshall briketleri



Resim 12.1. Marshall briketlerine ait örnekler

EK-13 Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

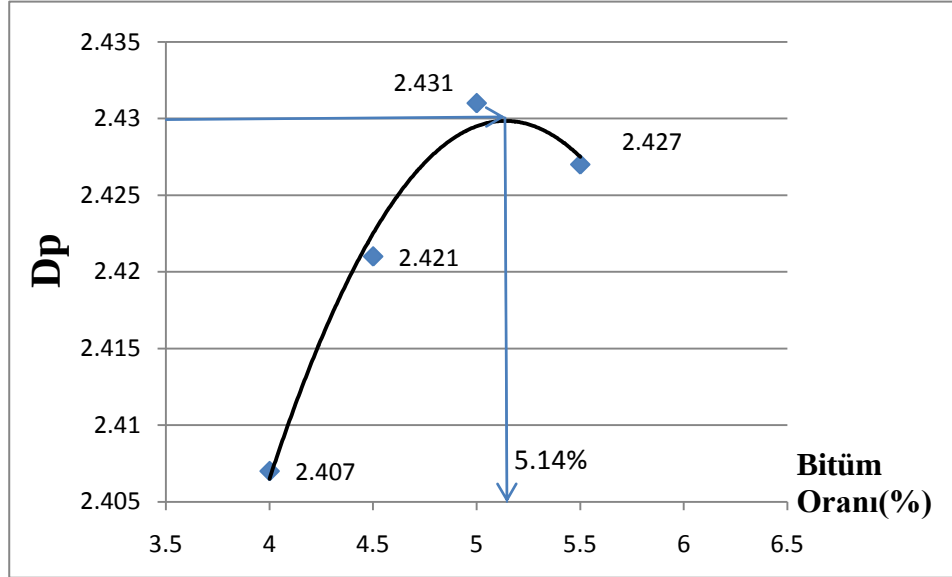
Briket No	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,6	63,5	63,7	63,6	1207	707	1209	502	2,404					2,05	216	0,998	794,93
4,0/2	4,0	46	63,7	63,7	63,9	63,7	1210	711	1213	502	2,410	2,573	6,45	15,46	58,28	2,45	228	0,995	837,19
4,0/3			63,5	63,6	63,7	63,6	1208	709	1211	502	2,406					2,12	221	0,998	813,60
										ORT.	2,407					2,21			815,24

4,5/1			63,8	63,9	63,7	63,7	1212	713	1209	496	2,444					2,35	240	0,995	881,87
4,5/2	4,5	51,75	63,3	63,5	63,7	63,5	1208	709	1213	504	2,397	2,554	5,21	15,37	66,07	1,98	232	1	856,42
4,5/3			63,4	63,7	63,6	63,6	1210,5	711,5	1211	499,5	2,423					2,15	225	0,998	828,54
										ORT.	2,421					2,16			855,61

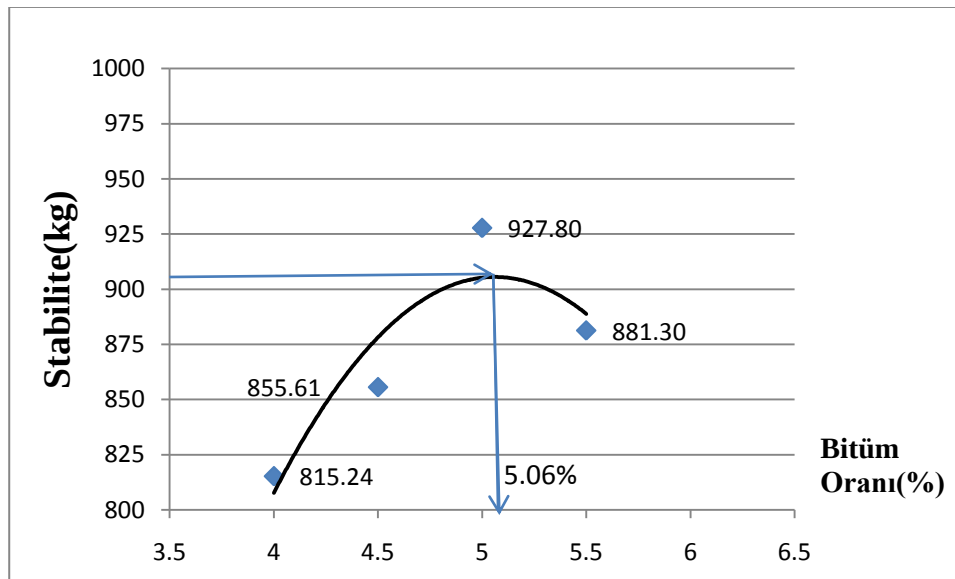
5,0/1			63,9	63,7	63,4	63,6	1214,5	717,5	1216	498,5	2,436					2,24	259	0,998	955,52
5,0/2	5,0	57,5	64	63,5	63,8	63,7	1218	719	1221	502	2,426	2,536	4,16	15,34	73,06	2,16	252	0,995	926,55
5,0/3			63,3	63,5	63,7	63,5	1212,5	716	1215	499	2,430					2,12	244	1	901,33
										ORT.	2,431					2,17			927,80

5,5/1			63,1	63,5	63,8	63,6	1217	717	1219	502	2,424					2,25	248	0,998	914,44
5,5/2	5,5	63,25	64,1	64	63,7	63,9	1219	719	1220,5	501,5	2,431	2,518	3,63	15,97	77,26	2,32	240	0,99	877,38
5,5/3			63,7	63,9	63,6	63,7	1218	718	1220	502	2,426					2,34	232	0,995	852,08
										ORT.	2,427					2,30			881,30

EK-14 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri

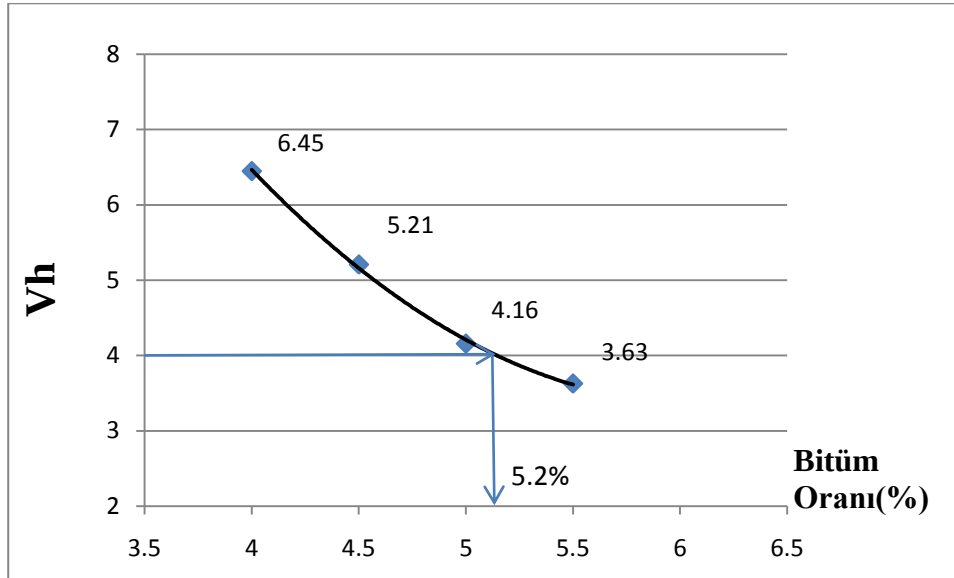


Şekil 14.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

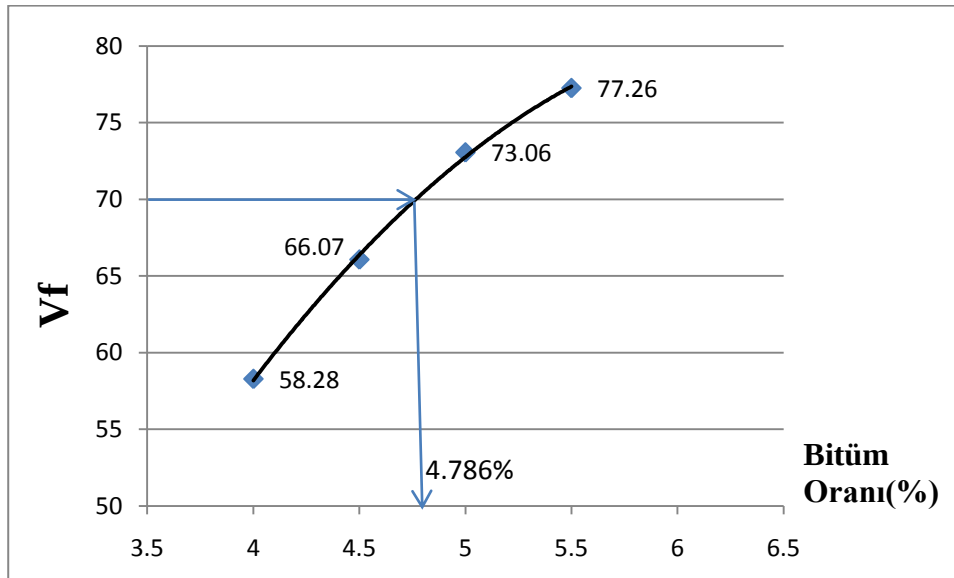


Şekil 16.2. Stabilité-Bitüm oranı grafiği

EK-14 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri

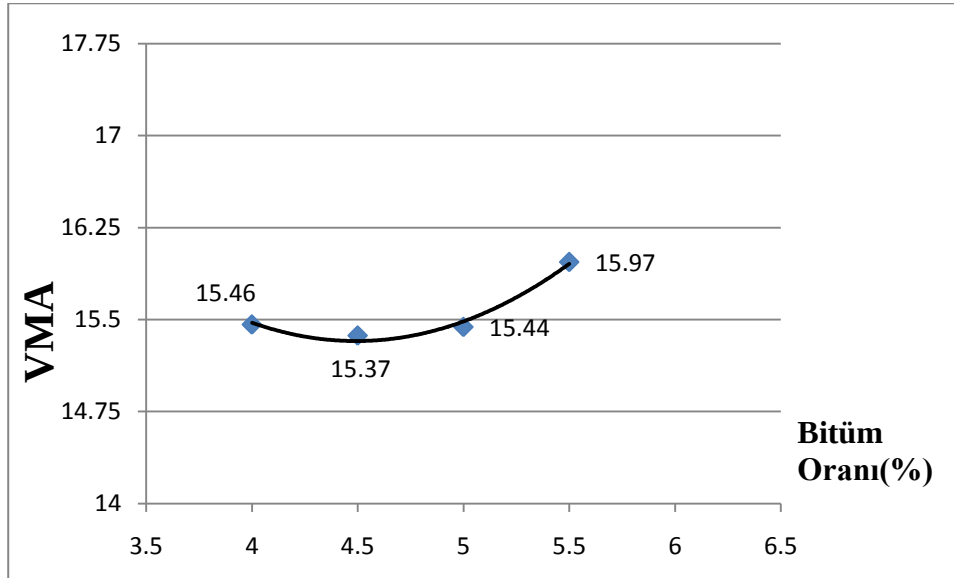


Şekil 14.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

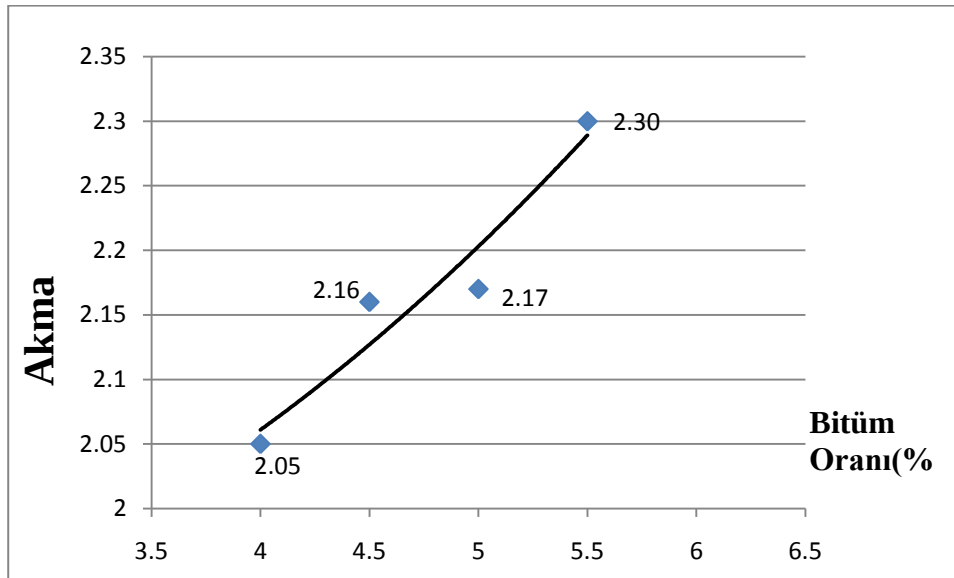


Şekil 14.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-14 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri



Şekil 14.5. VMA-Bitüm oranı grafiği



Şekil 14.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

EK-15. %1 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

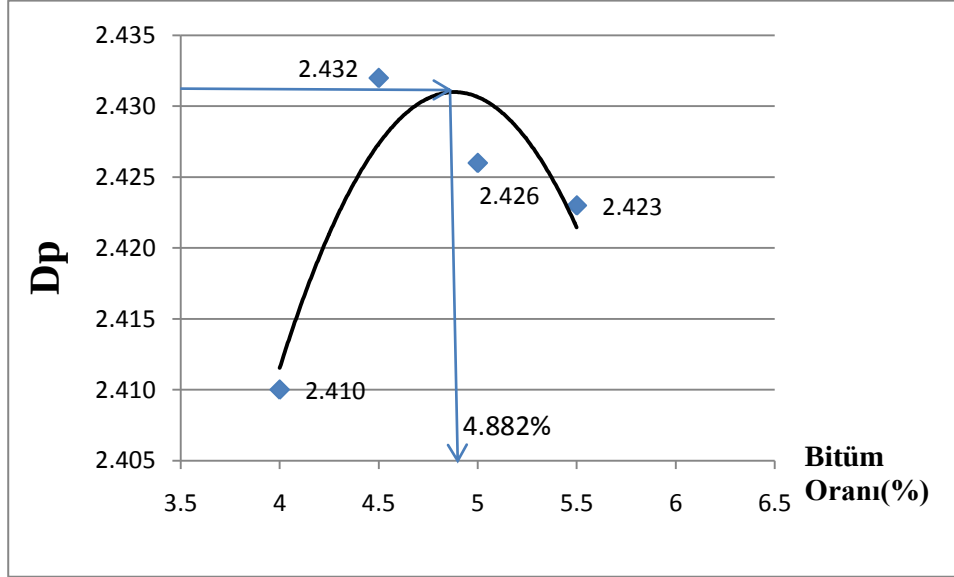
Briket No	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,5	63,8	64,2	63,9	1209	709	1211	502	2,408					1,85	239	0,99	873,67
4,0/2	4,0	46	64,1	64,2	63,8	64,0	1211	712	1213,5	501,5	2,415	2,573	6,35	15,38	58,67	2,12	232	0,988	846,00
4,0/3			63,6	63,6	63,8	63,7	1210	710	1213	503	2,406					1,98	219	0,995	803,67
										ORT.	2,410					1,98			841,11

4,5/1			63,3	63,8	63,5	63,6	1213	713	1209	496	2,446					2,25	249	0,998	918,17
4,5/2	4,5	51,75	63,0	63,1	63,0	63,0	1212	712	1208	496	2,444	2,554	4,8	15,00	67,99	1,87	258	1,013	966,26
4,5/3			63,5	63,6	63,9	63,7	1208	708	1210	502	2,406					2,34	238	0,995	874,42
										ORT.	2,432					2,15			919,62

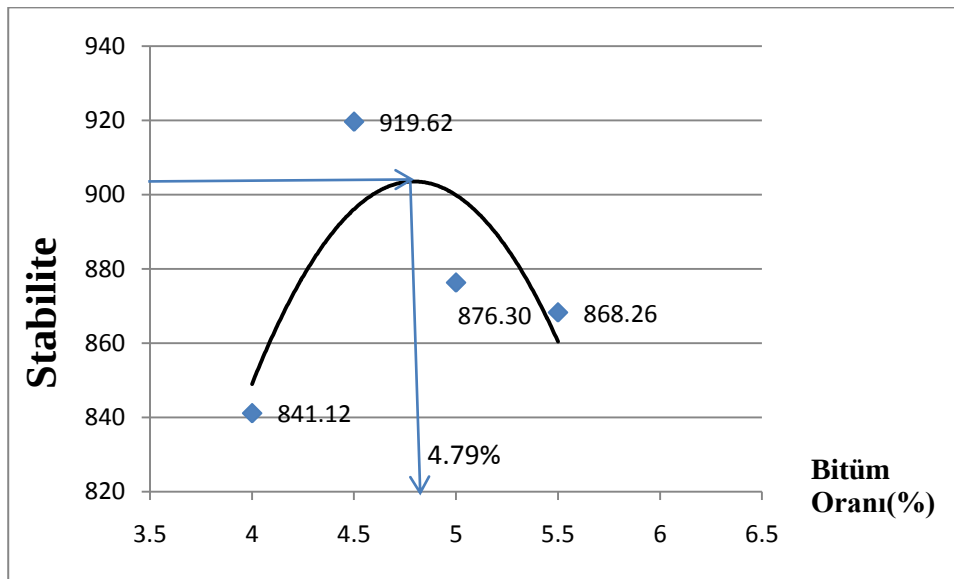
5,0/1			63,4	63,7	63,7	63,6	1214	715	1215,5	500,5	2,426					2,25	234	0,998	862,15
5,0/2	5,0	57,5	64,2	63,9	63,5	63,8	1216	717	1217,5	500,5	2,430	2,536	4,37	15,62	72,06	2,15	228	0,993	835,48
5,0/3			63,2	63,4	63,8	63,5	1212	713	1213,5	500,5	2,422					2,00	252	1	931,26
										ORT.	2,426					2,13			876,30

5,5/1			63,9	63,8	63,4	63,7	1216	716	1217,5	501,5	2,425					1,97	232	0,995	852,08
5,5/2	5,5	63,25	63,5	63,6	63,6	63,5	1214	714	1215	501	2,423	2,518	3,79	16,11	76,47	2,12	230	1	848,94
5,5/3			64,1	63,9	63,8	63,9	1218	717	1220	503	2,421					2,44	215	0,99	784,76
										ORT.	2,423					2,18			828,59

EK-16 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 İAP Marshall tasarım grafikleri

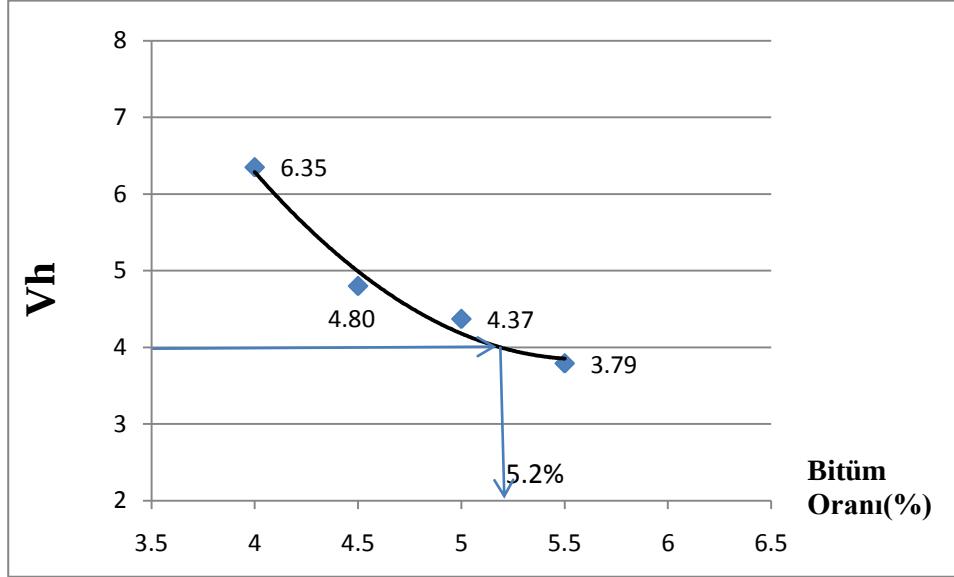


Şekil 16.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

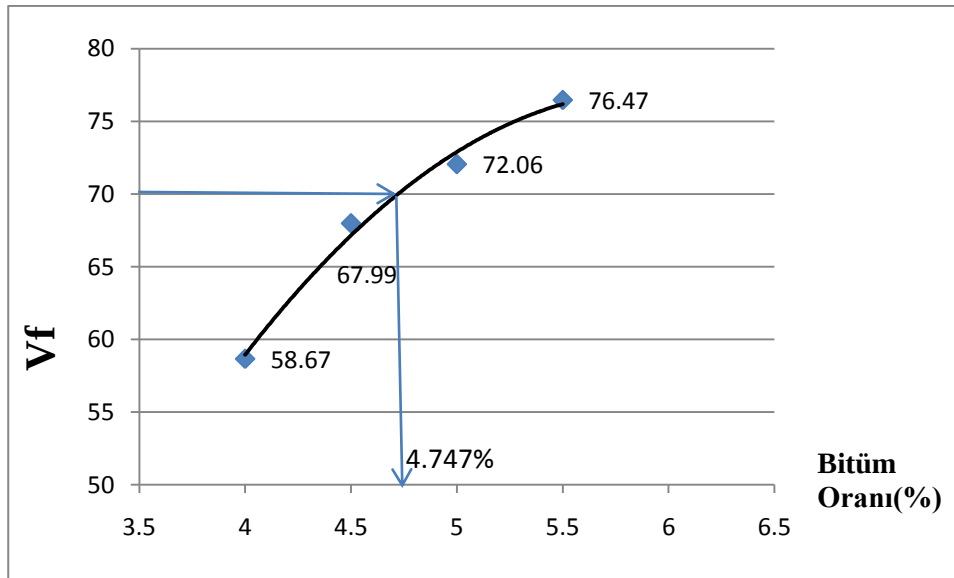


Şekil 16.2. Stabilite-Bitüm oranı grafiği

EK-16 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 İAP
Marshall tasarım grafikleri

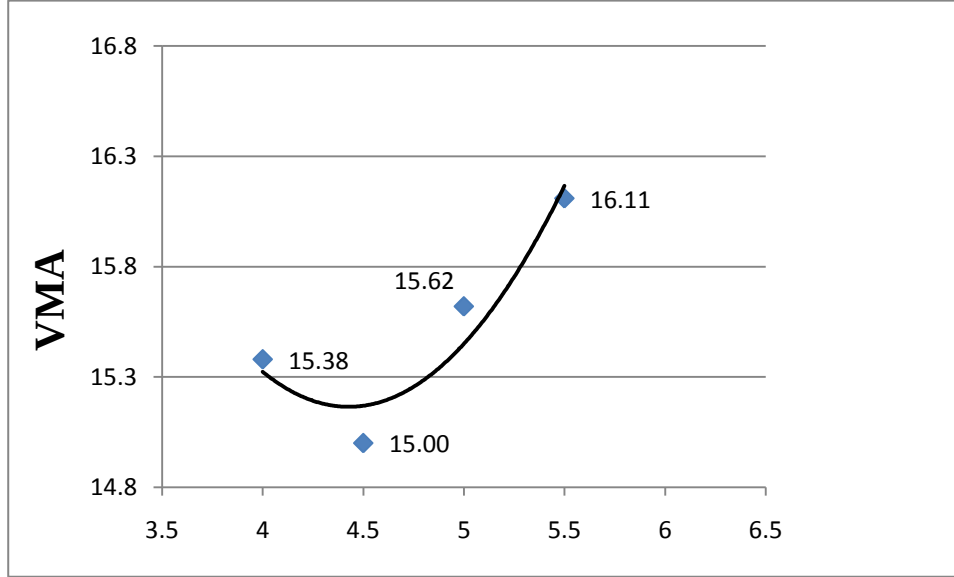


Şekil 16.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

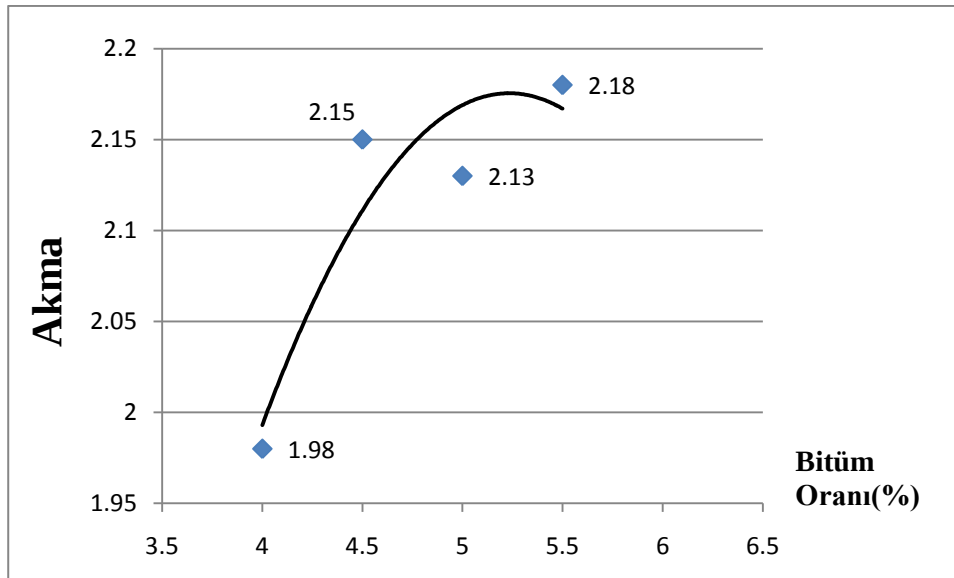


Şekil 16.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-16 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 İAP
Marshall tasarım grafikleri



Şekil 16.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

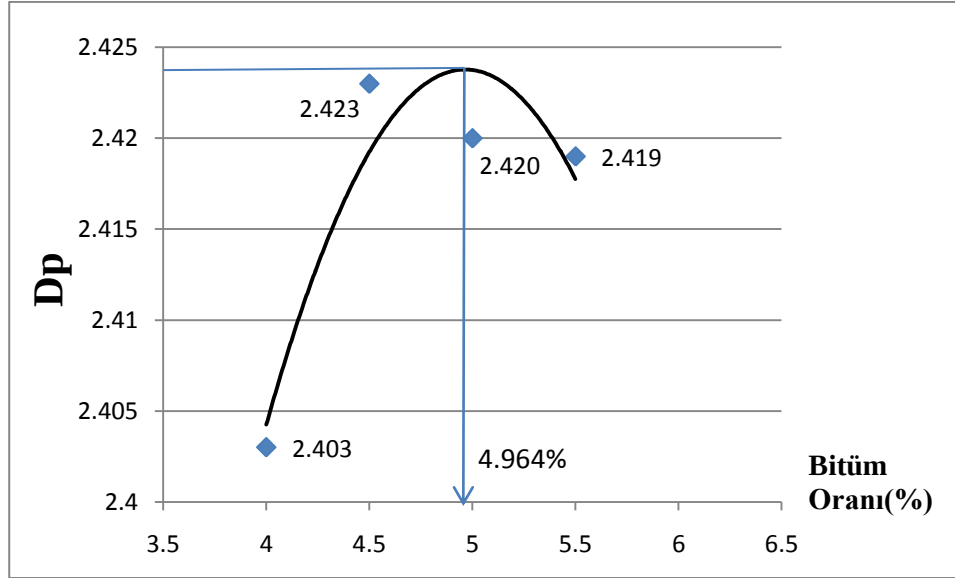


Şekil 16.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

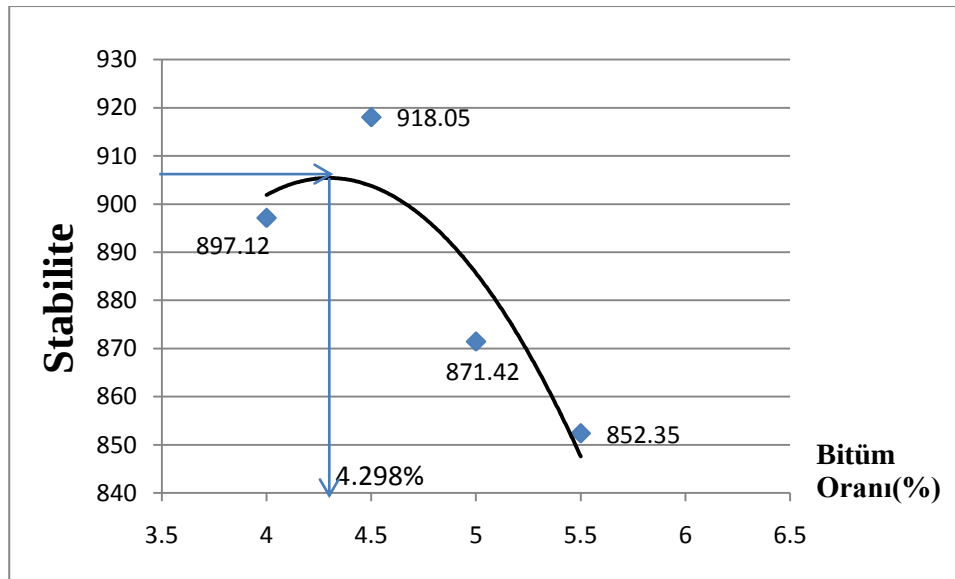
EK-17. %2 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,4	63,7	63,9	63,7	1207,5	708	1210	502	2,405					2,24	248	0,995	911,65
4,0/2	4,0	46	63,8	63,7	63,5	63,6	1206	706	1209,5	503,5	2,395	2,573	6,61	15,61	57,65	1,95	252	0,998	929,37
4,0/3			63,6	63,7	64,0	63,8	1209	709	1211	502	2,408					2,74	232	0,993	850,34
										ORT.	2,403					2,31			897,12
4,5/1			63,5	63,5	63,7	63,6	1208	711	1210	499	2,421					2,16	248	0,998	914,44
4,5/2	4,5	51,75	64,1	63,6	63,9	63,8	1210	712,5	1211,5	499	2,425	2,554	5,13	15,30	66,43	2,00	259	0,993	950,67
4,5/3			63,5	63,4	63,4	63,4	1206	710	1207,5	497,5	2,424					1,88	240	1,003	889,05
										ORT.	2,423					2,01			918,05
5,0/1			63,8	63,6	63,2	63,5	1209	712	1211	499	2,423					1,95	246	1	908,81
5,0/2	5,0	57,5	63,5	63,6	63,9	63,7	1213	714	1215	501	2,421	2,536	4,58	15,81	71,04	1,88	228	0,95	837,18
5,0/3			63,1	63,5	63,2	63,3	1207	710	1209,5	499,5	2,416					2,35	234	1,005	868,28
										ORT.	2,420					2,06			871,42
5,5/1			63,6	63,5	63,9	63,7	1218	716,5	1220	503,5	2,419					2,00	229	0,995	840,91
5,5/2	5,5	63,25	63,2	63,3	63,5	63,3	1215	715	1217,5	502,5	2,418	2,518	3,95	16,25	75,66	1,84	245	1,005	909,65
5,5/3			63,1	63,3	63,7	63,4	1216	715,5	1218	502,5	2,420					2,55	218	1,003	806,48
										ORT.	2,419					2,13			852,35

EK-18 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 İAP Marshall tasarım grafikleri

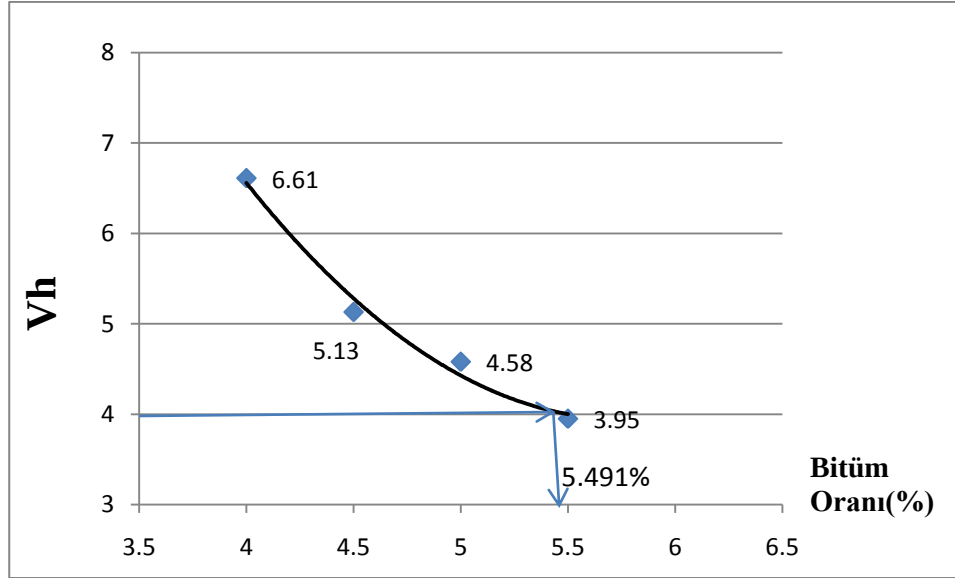


Şekil 18.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

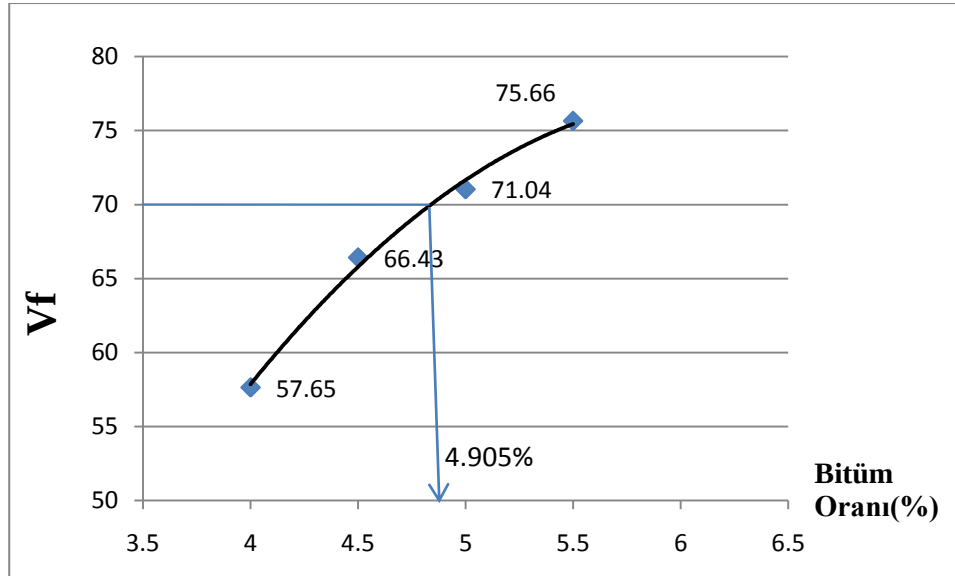


Şekil 18.2. Stabilite-Bitüm oranı grafiği

EK-18 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 İAP
Marshall tasarım grafikleri

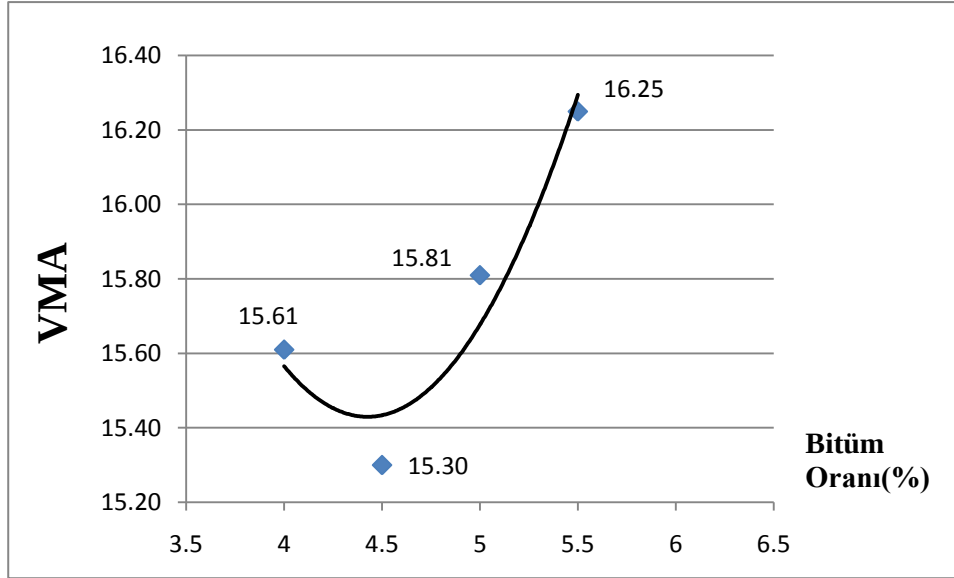


Şekil 18.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

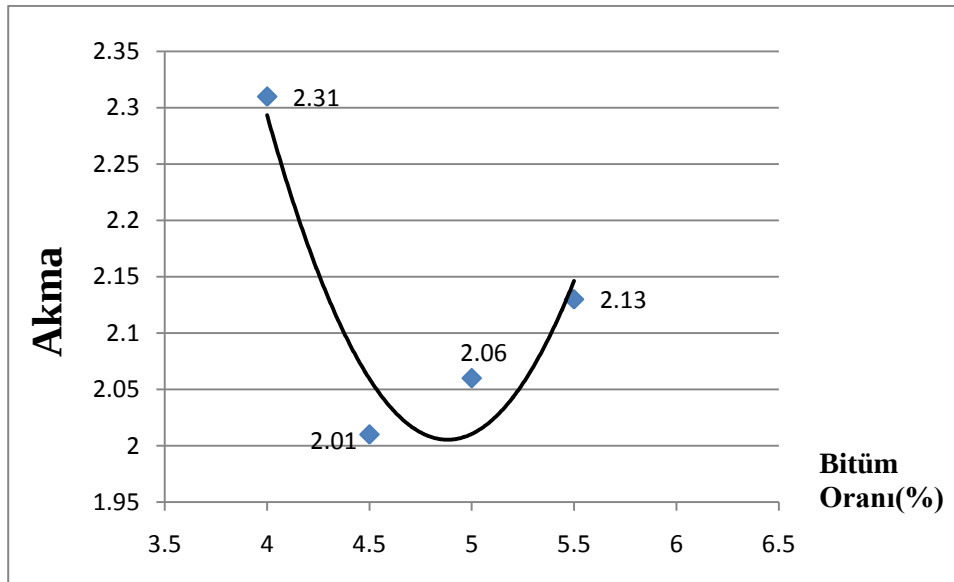


Şekil 18.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-18 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 İAP Marshall tasarım grafikleri



Şekil 18.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

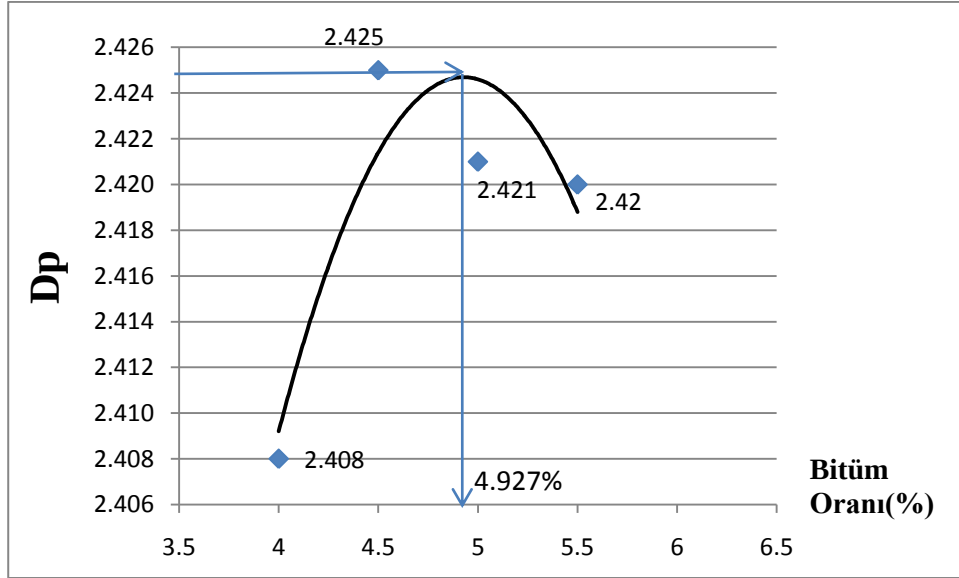


Şekil 18.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

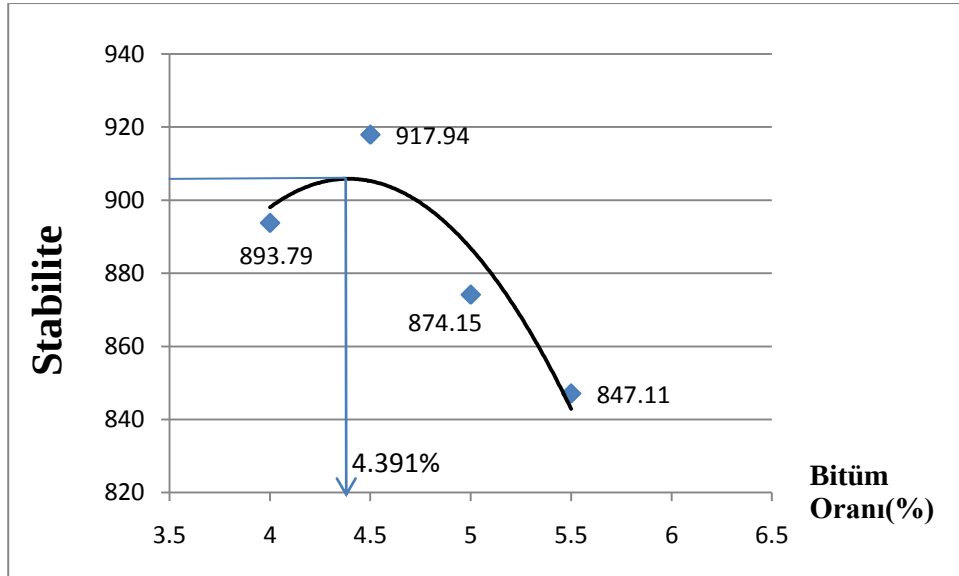
EK-19. %3 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,9	63,8	63,5	63,7	1208,5	710	1212	502	2,407					1,91	250	0,995	919,10
4,0/2	4,0	46	63,5	63,7	63,5	63,6	1207	707,5	1210	502,5	2,402	2,573	6,41	15,42	58,45	1,87	251	0,998	925,64
4,0/3			64,2	63,7	63,8	63,9	1210	712	1213	501	2,415					2,00	229	0,99	836,62
										ORT.	2,408					1,93			893,79
4,5/1			63,5	63,6	63,8	63,7	1212,5	714,5	1215	500,5	2,423					1,85	248	1	916,29
4,5/2	4,5	51,75	63,9	63,7	63,4	63,6	1209	712,5	1211	498,5	2,425	2,554	5,07	15,24	66,73	1,78	234	0,998	862,15
4,5/3			63,7	64,0	63,8	63,9	1213,5	715,5	1215,5	500	2,427					1,91	263	1,003	975,38
										ORT.	2,425					1,85			917,94
5,0/1			63,5	63,6	63,2	63,4	1214	715	1216	501	2,423					2,00	235	1,003	870,28
5,0/2	5,0	57,5	63,4	63,6	63,7	63,6	1215,5	716	1217,5	501,5	2,424	2,536	4,54	15,78	71,21	2,42	227	0,998	836,01
5,0/3			63,1	63,0	63,3	63,2	1213	714	1216	502	2,416					2,25	246	1,008	916,17
										ORT.	2,421					2,22			874,15
5,5/1			63,4	63,3	63,7	63,5	1217	717	1219,5	502,5	2,422					1,87	222	1	819,00
5,5/2	5,5	63,25	63,0	63,1	63,3	63,1	1214	715	1217	502	2,418	2,518	3,90	16,21	75,90	2,35	245	1,01	914,23
5,5/3			63,2	63,4	63,2	63,3	1215	716	1218	502	2,420					1,80	218	1,005	808,11
										ORT.	2,420					2,01			847,11

EK-20 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 İAP Marshall tasarım grafikleri

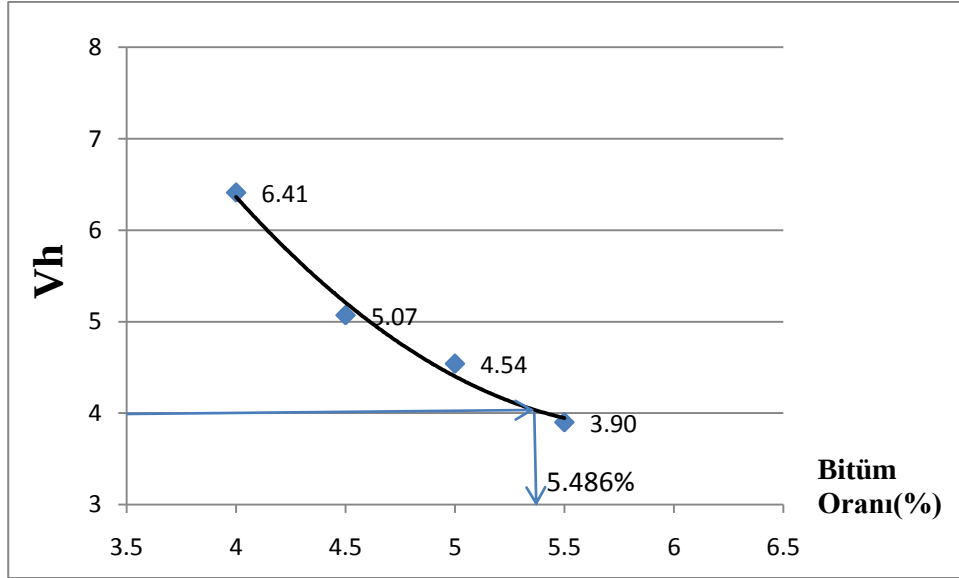


Şekil 20.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

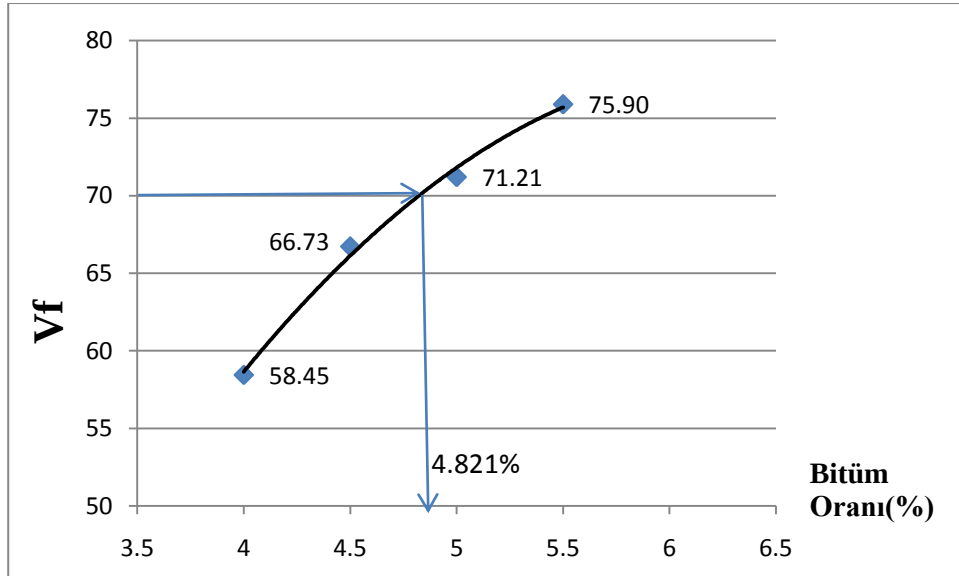


Şekil 20.2. Stabilite-Bitüm oranı grafiği

EK-20 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 İAP
Marshall tasarım grafikleri

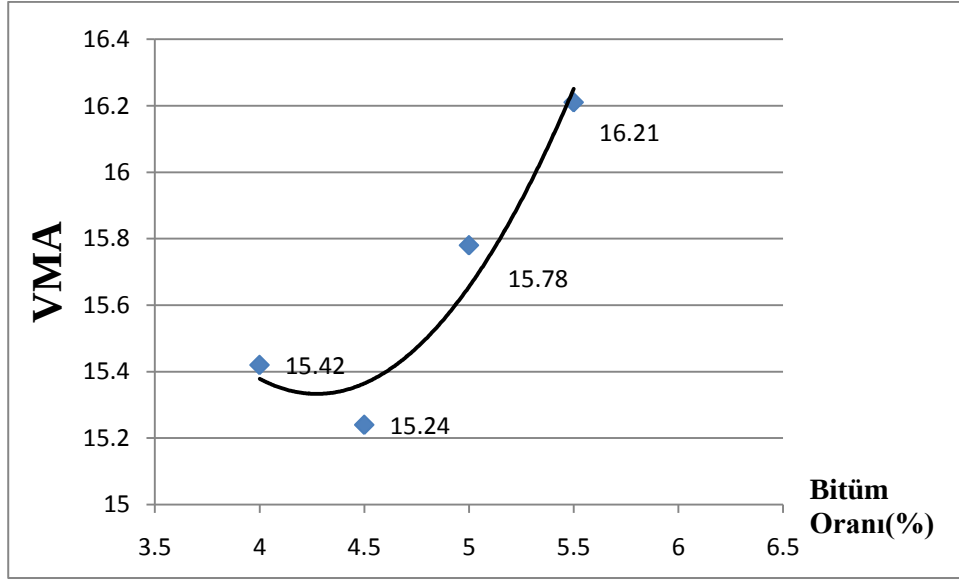


Şekil 20.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

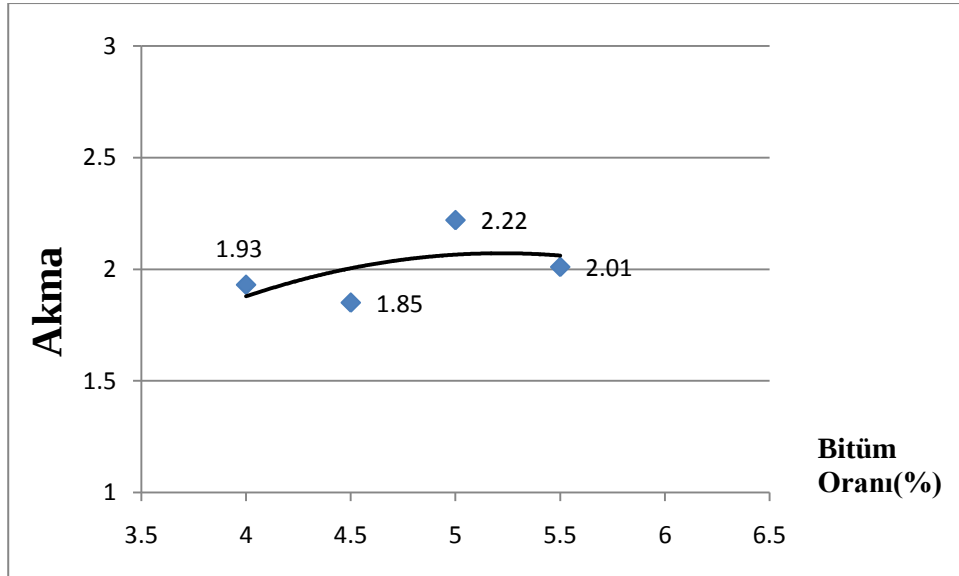


Şekil 20.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-20 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 İAP
Marshall tasarım grafikleri



Şekil 20.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

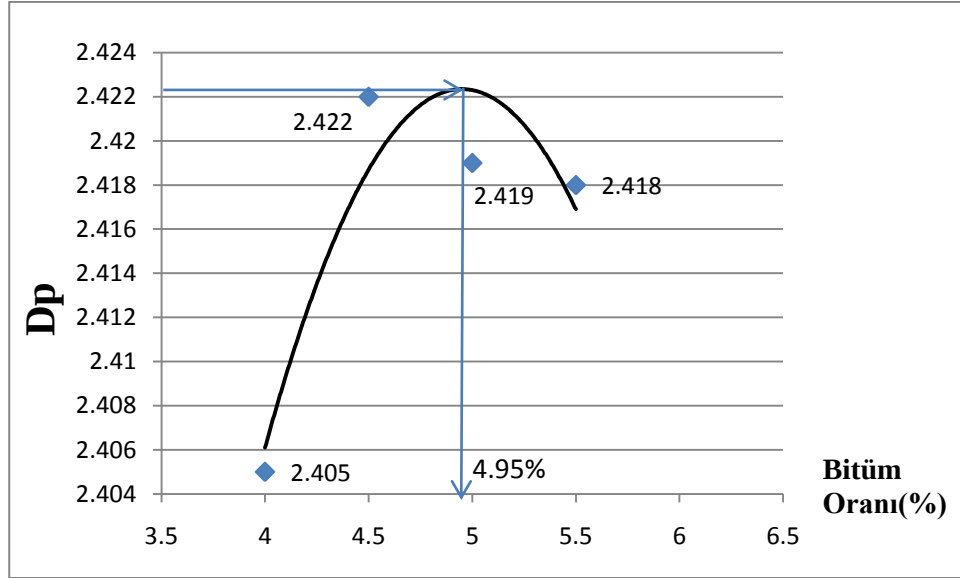


Şekil 20.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

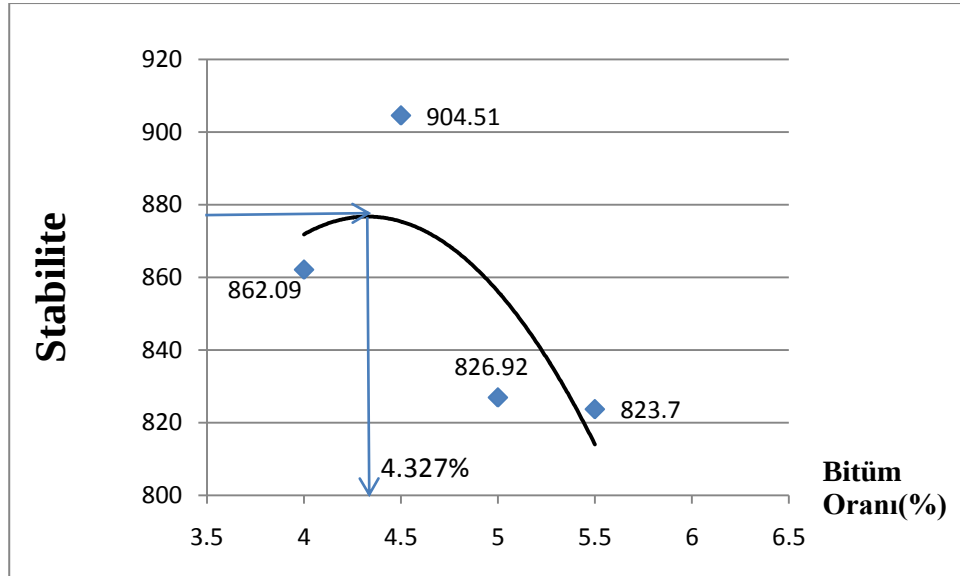
EK-21. %5 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,4	63,9	63,5	63,6	1207	707	1210	503	2,400					1,74	245	0,998	865,88
4,0/2	4,0	46	64,2	63,9	63,5	63,8	1210	711	1214	503	2,406	2,573	6,53	15,53	57,96	1,82	250	0,993	880,07
4,0/3			63,7	64,1	64,2	63,9	1211	712	1214,5	502,5	2,410					2,14	240	0,99	840,33
										ORT.	2,405					1,90			862,09
4,5/1			63,7	63,6	64,0	63,8	1212	714,5	1214	499,5	2,426					2,26	248	0,993	872,64
4,5/2	4,5	51,75	63,3	63,2	63,6	63,4	1209	711,5	1212	500,5	2,416	2,554	5,18	15,34	66,23	2,10	254	1,003	904,06
4,5/3			63,9	63,7	63,3	63,6	1211	713,5	1213	499,5	2,424					1,95	264	0,998	936,84
										ORT.	2,422					2,10			904,51
5,0/1			63,7	63,6	63,2	63,5	1216	716	1218,5	502,5	2,420					1,95	239	1	845,19
5,0/2	5,0	57,5	63,1	63,3	63,1	63,2	1215	715	1217	502	2,420	2,536	4,62	15,86	70,82	2,24	234	1,008	833,19
5,0/3			63,4	63,7	63,7	63,6	1218	717	1221	504	2,417					2,62	228	0,998	802,4
										ORT.	2,419					2,27			826,92
5,5/1			63,9	63,4	63,5	63,6	1217	715,5	1218,5	503	2,419					2,60	233	0,998	821,07
5,5/2	5,5	63,25	63,0	63,2	63,2	63,1	1214	714	1216	502	2,418	2,518	3,98	16,28	75,51	2,20	240	1,01	857,54
5,5/3			63,5	63,9	63,8	63,7	1218	716	1220	504	2,417					2,30	226	0,995	792,5
										ORT.	2,418					2,37			823,7

EK-22 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 İAP Marshall tasarım grafikleri

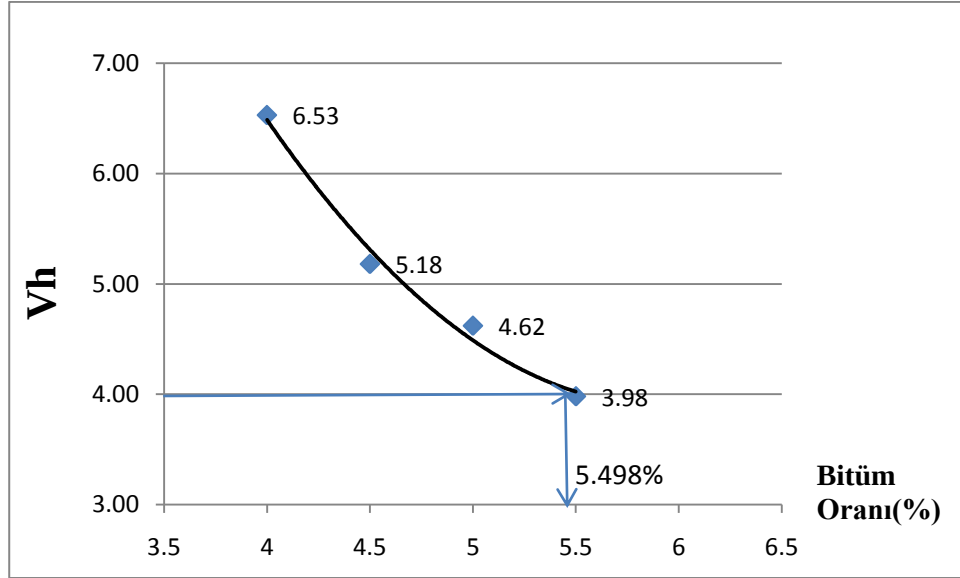


Şekil 22.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

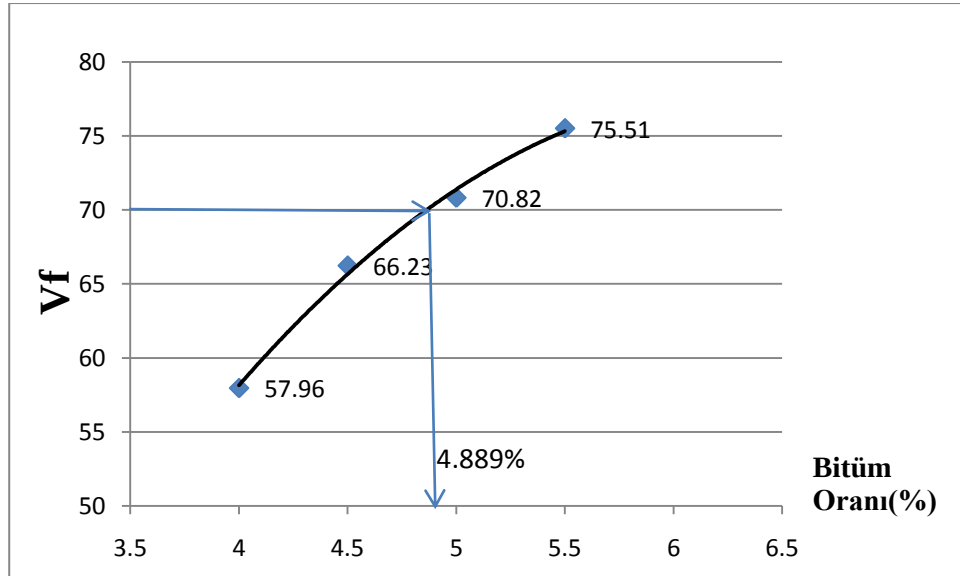


Şekil 22.2. Stabilite-Bitüm oranı grafiği

EK-22 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 İAP
Marshall tasarım grafikleri

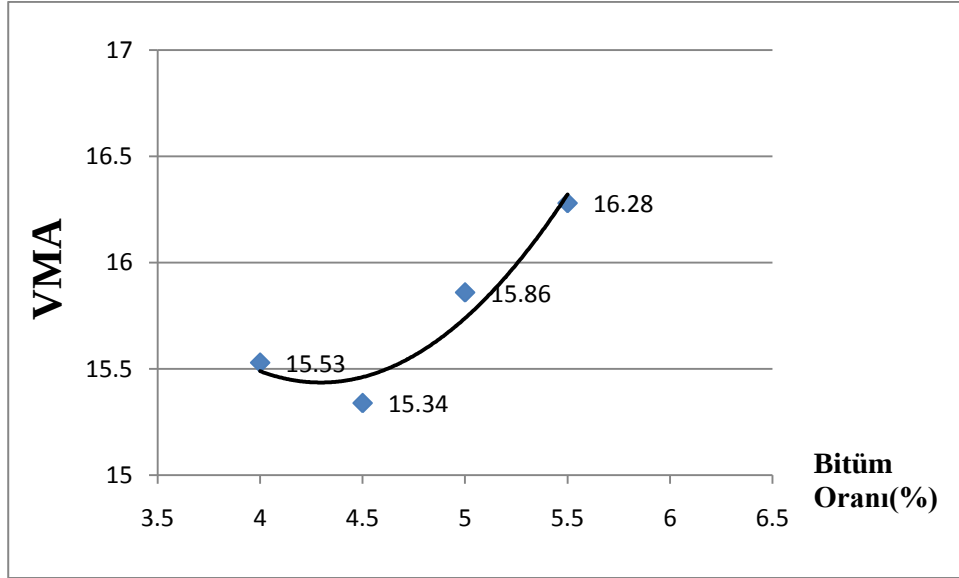


Şekil 22.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

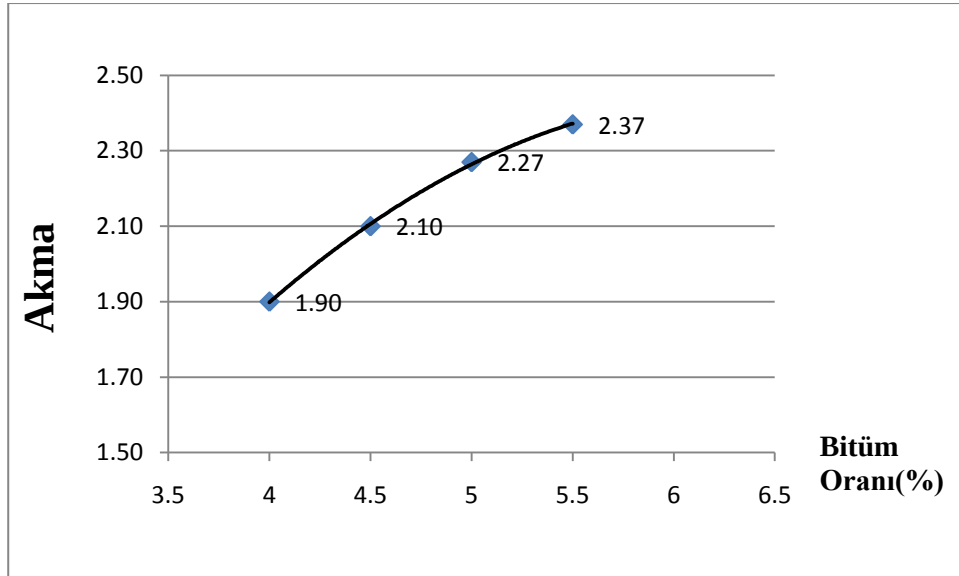


Şekil 22.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-22 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 İAP
Marshall tasarım grafikleri



Şekil 22.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

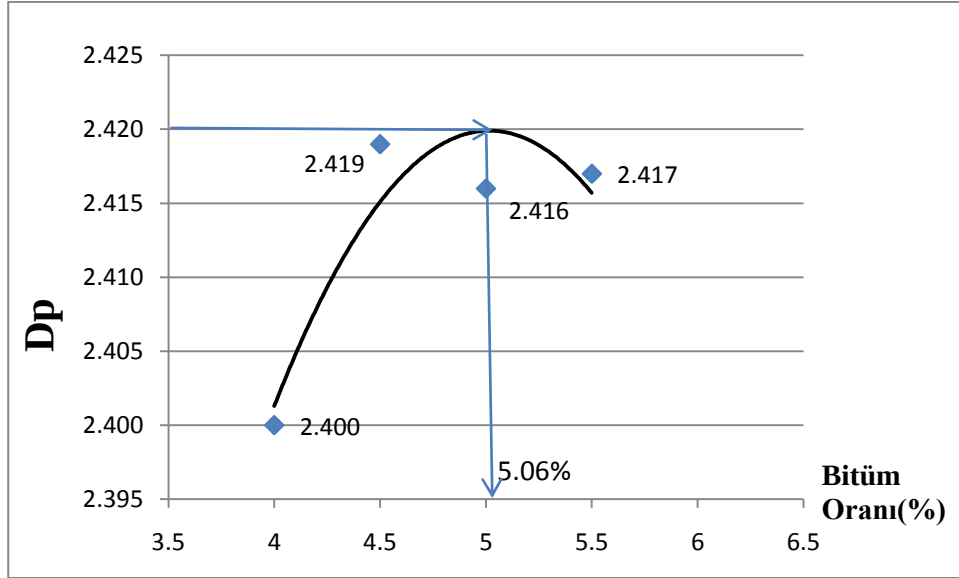


Şekil 22.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

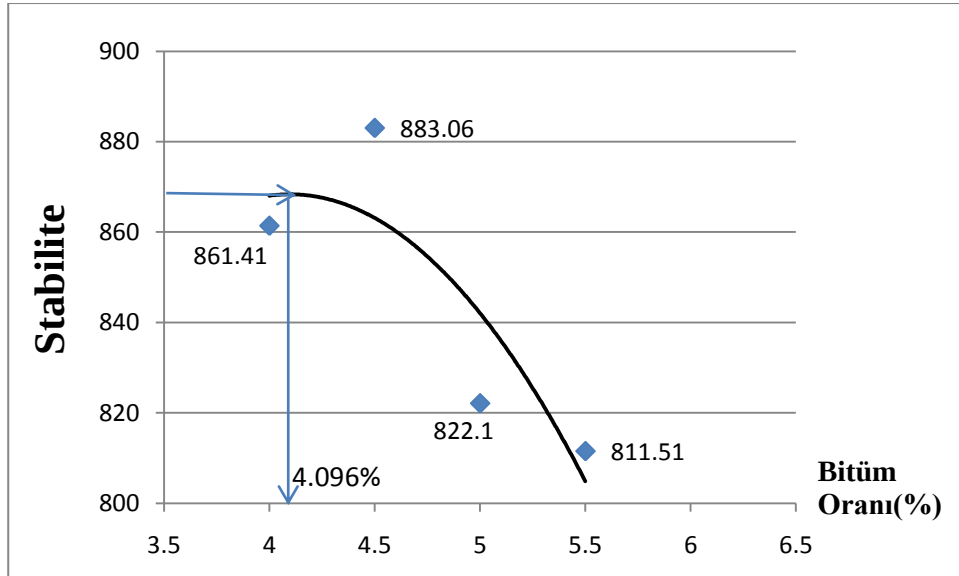
EK-23. %10 İAP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,7	63,1	63,0	63,3	1208	708	1211	503	2,402					1,90	236	1,005	838,19
4,0/2	4,0	46	64,1	64,0	63,6	63,8	1212	711	1216	505	2,400	2,573	6,72	15,71	57,19	2,40	245	0,993	861,49
4,0/3			63,6	63,8	63,5	63,6	1210	709	1213,5	504,5	2,398					2,30	250	0,998	884,56
										ORT.	2,400					2,20			861,41
4,5/1			63,9	63,7	63,4	63,6	1211	712,5	1213	500,5	2,420					1,74	258	0,998	914,44
4,5/2	4,5	51,75	63,3	63,4	63,7	63,5	1210	711,5	1212	500,5	2,418	2,554	5,30	15,45	65,69	1,85	252	1	893,84
4,5/3			63,9	63,8	63,5	63,7	1212,5	714	1215	501	2,420					1,90	239	0,995	840,91
										ORT.	2,419					1,83			883,06
5,0/1			63,3	63,5	63,9	63,6	1216	715,5	1218,5	503	2,417					2,00	233	0,998	821,07
5,0/2	5,0	57,5	63,1	63,0	63,2	63,1	1213	714	1216	502	2,416	2,536	4,72	15,94	70,35	1,95	239	1,01	853,76
5,0/3			63,6	63,6	63,2	63,4	1215	714,5	1217,5	503	2,416					1,80	224	1,003	791,46
										ORT.	2,416					1,92			822,1
5,5/1			63,5	63,8	63,7	63,6	1218	717	1221	504	2,417					2,30	234	0,998	824,8
5,5/2	5,5	63,25	63,1	63,2	63,0	63,0	1214	714	1216	502	2,418	2,518	4,00	16,31	75,36	2,50	225	1,013	803,26
5,5/3			63,6	63,3	63,7	63,5	1217	716	1219,5	503,5	2,417					2,22	228	1,003	806,47
										ORT.	2,417					2,34			811,51

EK-24 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 İAP Marshall tasarım grafikleri

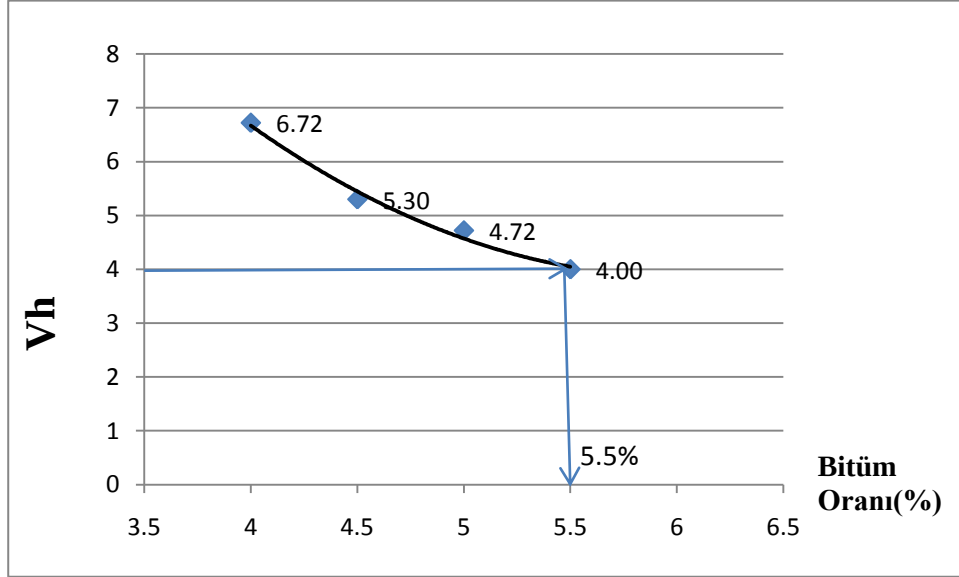


Şekil 24.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

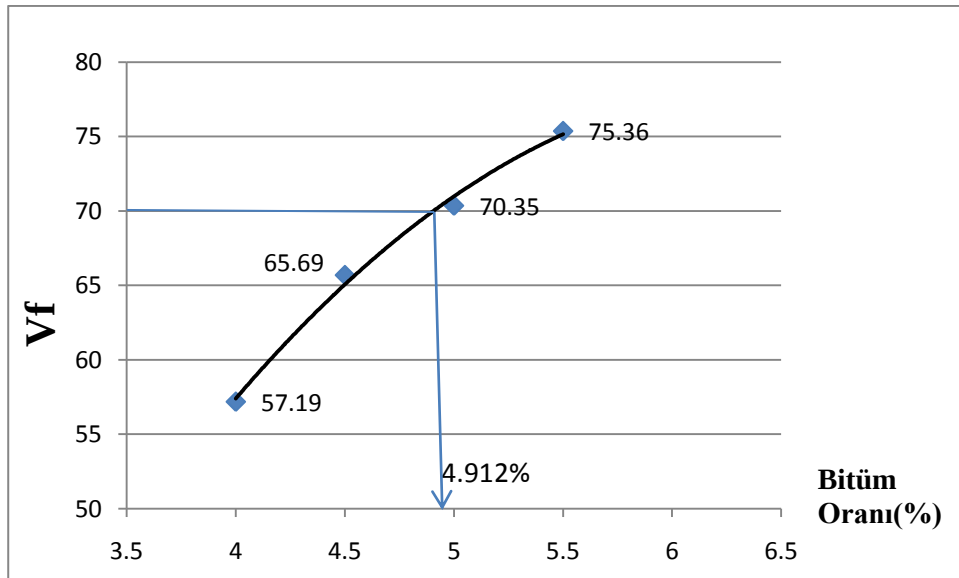


Şekil 24.2. Stabilite-Bitüm oranı grafiği

EK-24 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 İAP
Marshall tasarım grafikleri

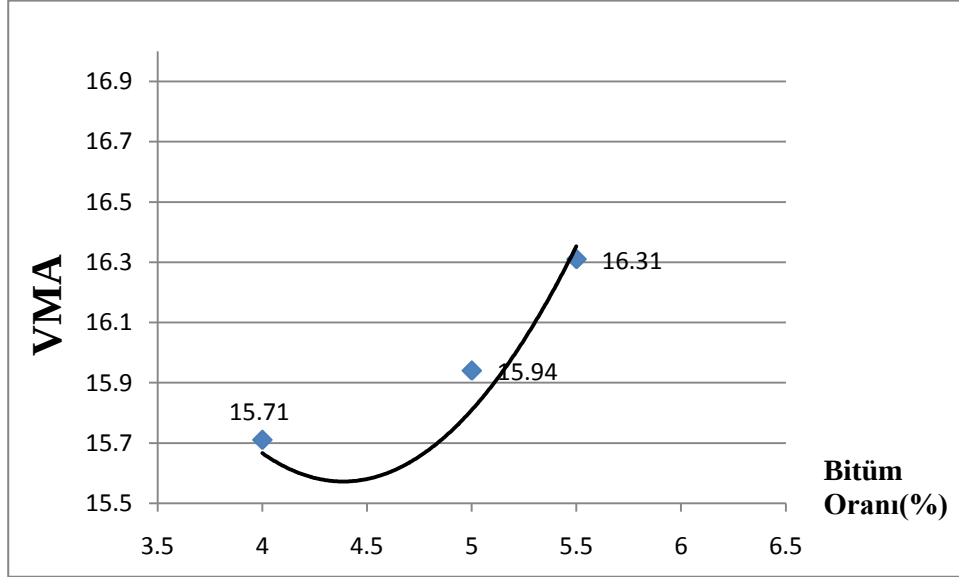


Şekil 24.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

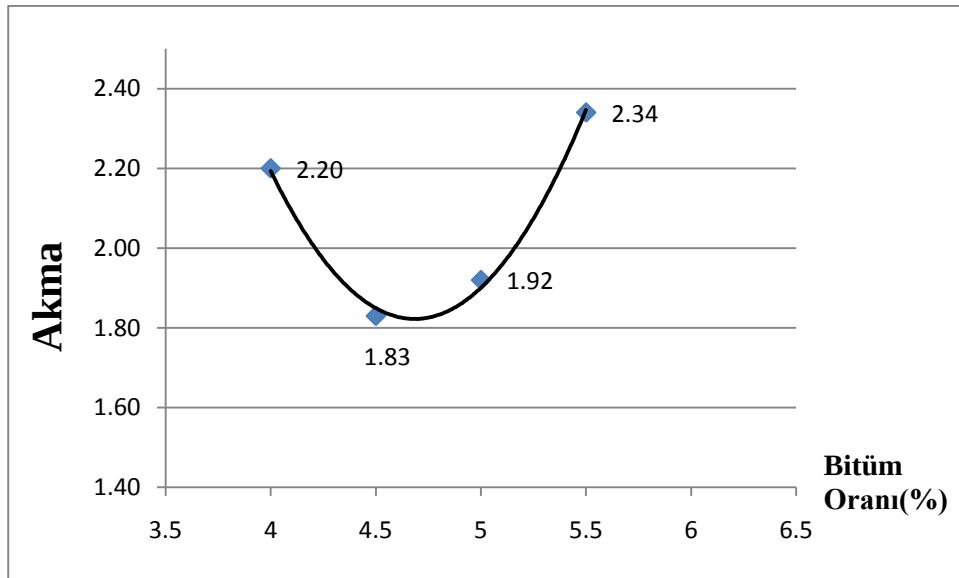


Şekil 24.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-24 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 İAP
Marshall tasarım grafikleri



Şekil 24.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

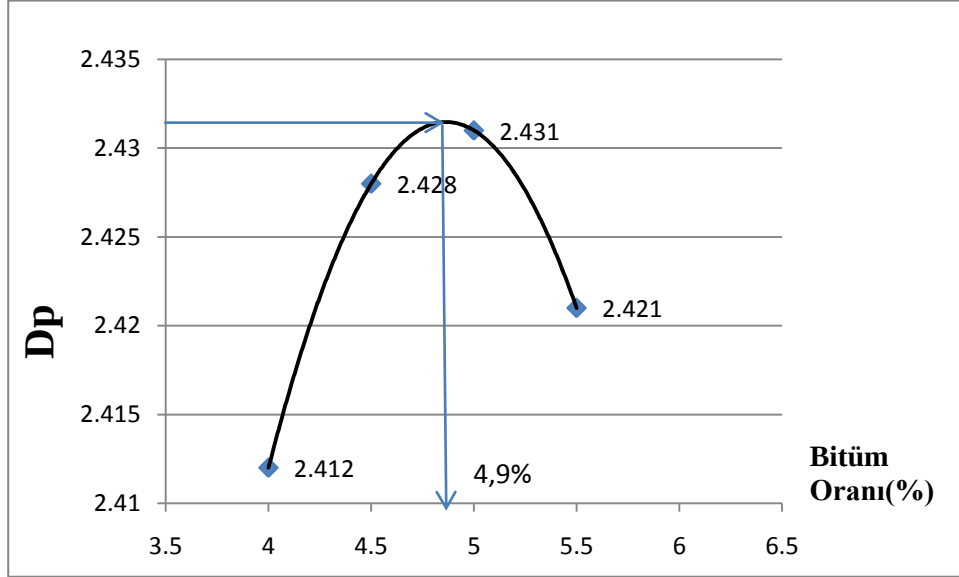


Şekil 24.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

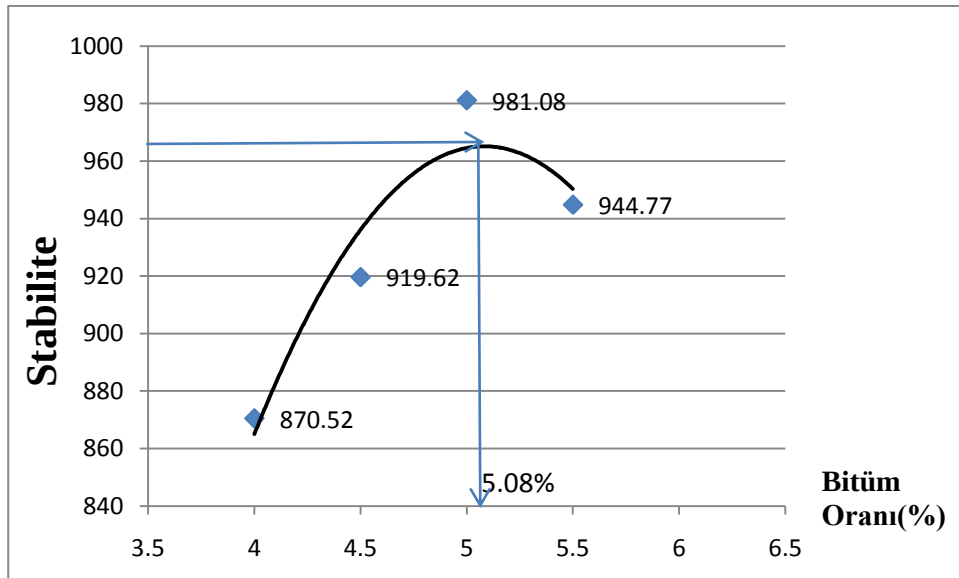
EK-25. %1 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,9	63,8	63,4	63,7	1209	710,5	1211	500,5	2,416					1,92	245	0,995	900,48
4,0/2	4,0	46	63,3	63,7	63,8	63,6	1208	709	1210,5	501,5	2,409	2,573	6,28	15,31	58,98	2,14	235	0,998	865,88
4,0/3			63,9	63,6	63,1	63,5	1207,5	708	1209	501	2,410					2,50	229	1	845,19
										ORT.	2,412					2,19			870,52
4,5/1			63,3	63,4	63,6	63,4	1211	714	1213	499	2,427					1,84	239	1,003	918,17
4,5/2	4,5	51,75	63	63,1	63,2	63,1	1209,5	712,5	1210,5	498	2,429	2,554	4,93	15,12	67,38	2,30	264	1,01	966,26
4,5/3			63,4	63,5	63,8	63,6	1212,5	715	1214	499	2,430					2,25	263	0,998	874,42
										ORT.	2,428					2,13			919,62
5,0/1			63,7	63,4	63,8	63,6	1214,5	718	1217	499	2,434					1,95	258	0,998	951,78
5,0/2	5,0	57,5	64	63,7	63,1	63,5	1213	716,5	1216	499,5	2,428	2,536	4,14	15,43	73,14	2,50	269	1	994,88
5,0/3			63,1	63,0	63,2	63,0	1212	715,5	1214	498,5	2,431					2,32	266	1,013	996,59
										ORT.	2,431					2,26			981,08
5,5/1			63,0	63,3	63,4	63,2	1214	715,5	1217	501,5	2,421					2,32	262	1,008	976,52
5,5/2	5,5	63,25	63,7	63,1	63,5	63,4	1215,5	716,5	1219	502,5	2,419	2,518	3,86	16,17	76,12	2,65	245	1,003	907,82
5,5/3			63,2	63,4	63,8	63,5	1217	718	1220	502	2,424					2,80	257	1	949,97
										ORT.	2,421					2,59			944,77

EK-26 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 VP Marshall tasarım grafikleri

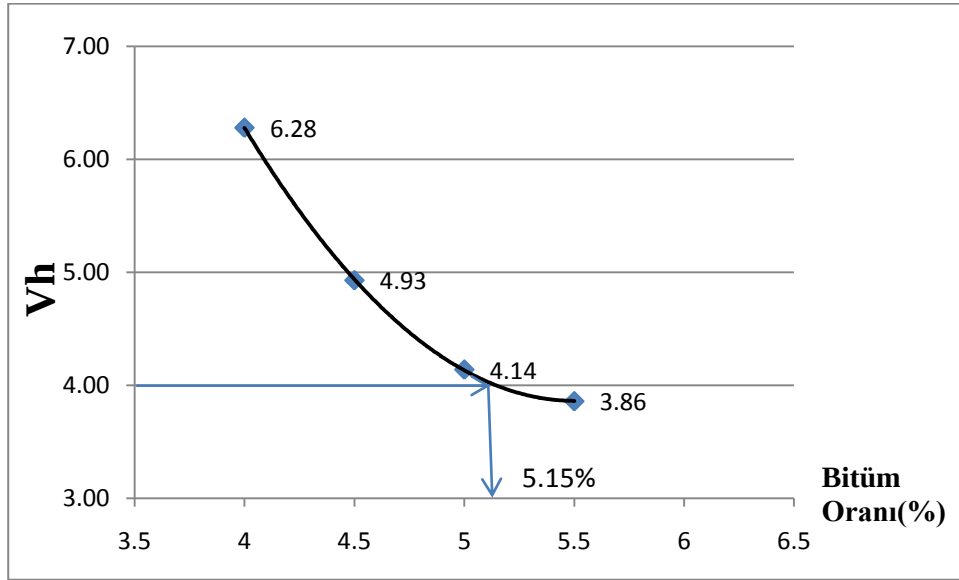


Şekil 26.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

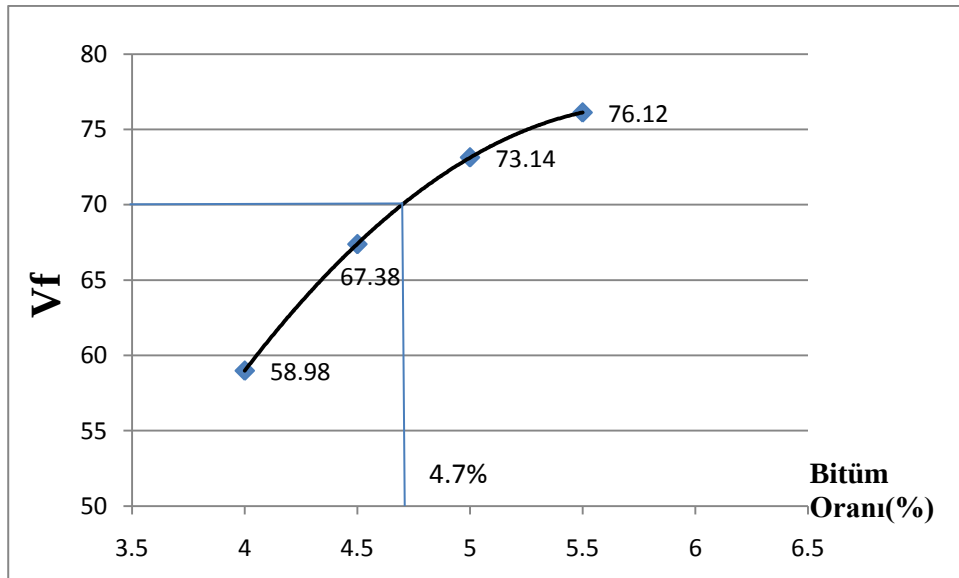


Şekil 26.2. Stabilite-Bitüm oranı grafiği

EK-26 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 VP Marshall tasarım grafikleri

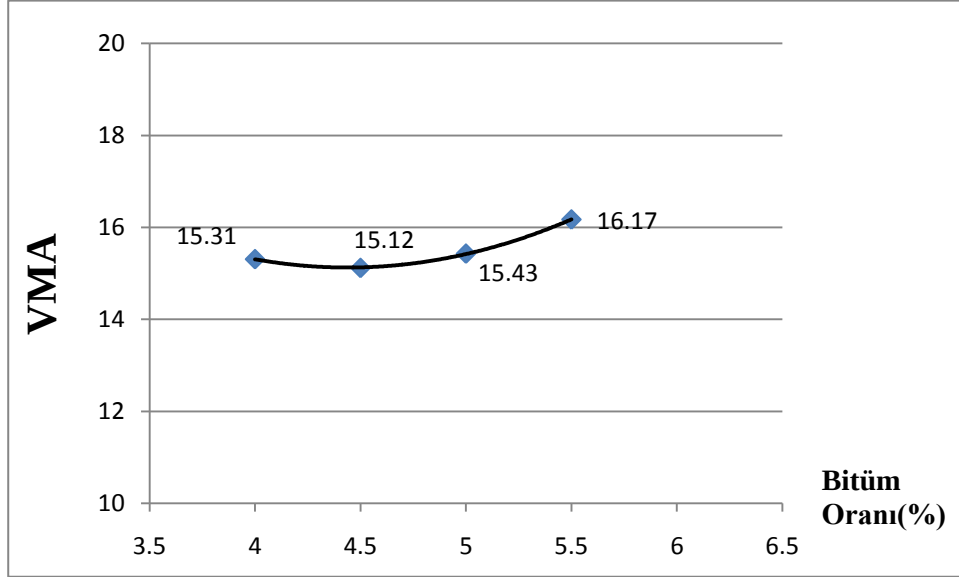


Şekil 26.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

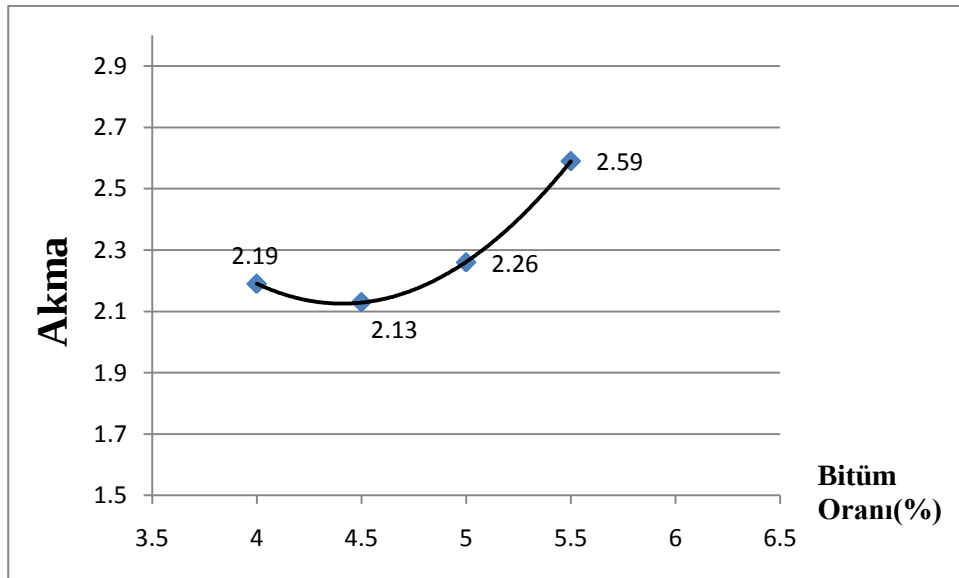


Şekil 26.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-26 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %1 VP Marshall tasarım grafikleri



Şekil 26.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

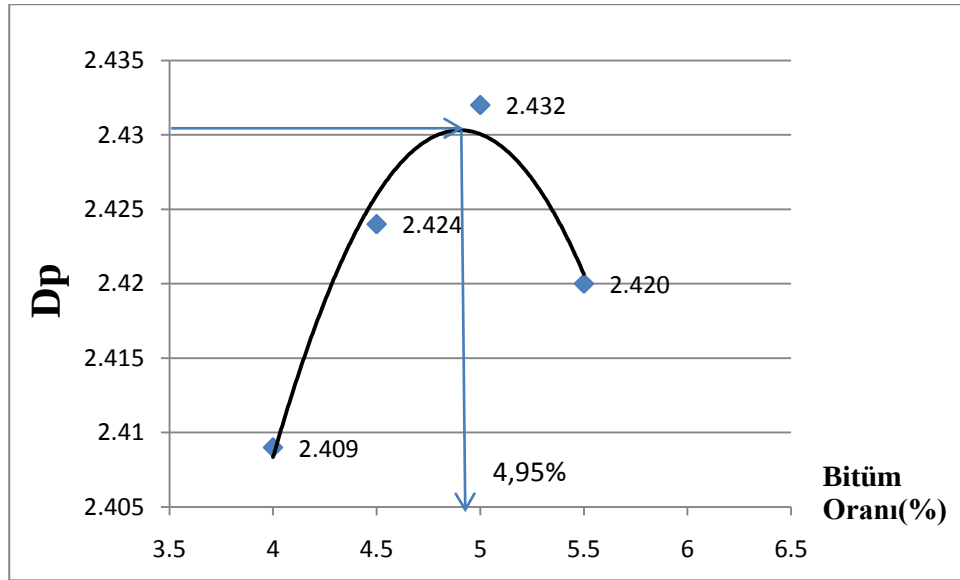


Şekil 26.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

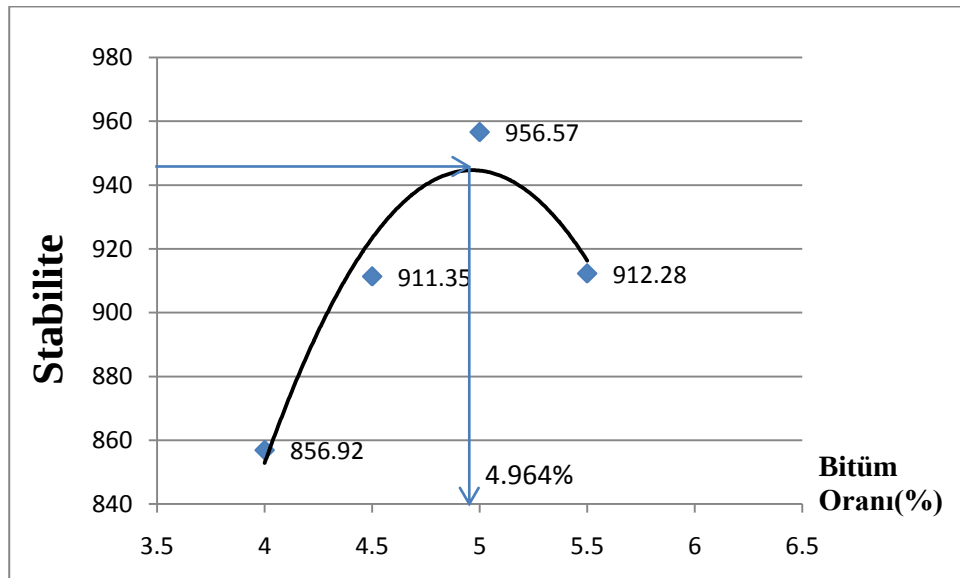
EK-27. %2 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,3	63,5	63,6	63,4	1206	708	1209	501	2.407					2,00	226	0,995	829,74
4,0/2	4,0	46	63,7	63,2	63,6	63,4	1205	707,5	1208,5	501	2.405	2,573	6,39	15,41	58,53	1,95	239	1	882,61
4,0/3			63,5	63,4	63,8	63,6	1208	709,5	1210	500,5	2.414					2,50	233	0,998	858,42
										ORT.	2,409					2,15			856,92
4,5/1			63,9	64,0	63,4	63,7	1213	714,5	1215	500,5	2.424					1,85	255	1,003	945,35
4,5/2	4,5	51,75	63,2	63,4	63,7	63,5	1210	712	1211	499	2.425	2,554	5,11	15,28	66,53	2,00	248	1,003	919,08
4,5/3			63,6	63,9	63,5	63,6	1211,5	713,5	1213,5	500	2.423					2,15	236	0,998	869,62
										ORT.	2,424					2,00			911,35
5,0/1			63,7	63,4	63,0	63,2	1212,5	715,5	1215	499,5	2.427					2,10	256	1,008	953,89
5,0/2	5,0	57,5	63,1	63,0	63,5	63,3	1214	717	1215	498	2.438	2,536	4,11	15,40	73,31	1,85	248	1,005	920,93
5,0/3			63,4	63,2	63,9	63,5	1215,5	718	1218	500	2.431					2,26	269	1	994,88
										ORT.	2,432					2,07			956,57
5,5/1			63,8	63,4	63,0	63,3	1215	716	1218	502	2,420					1,90	235	1,005	872,04
5,5/2	5,5	63,25	63,4	63,7	63,4	63,5	1217	718	1220,5	502,5	2,422	2,518	3,93	16,23	75,77	2,30	241	1	890,10
5,5/3			63,0	63,2	63,1	63,1	1213	715	1217	502	2,416					2,20	261	1,01	974,71
										ORT.	2,420					2,13			912,28

EK-28 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 VP Marshall tasarım grafikleri

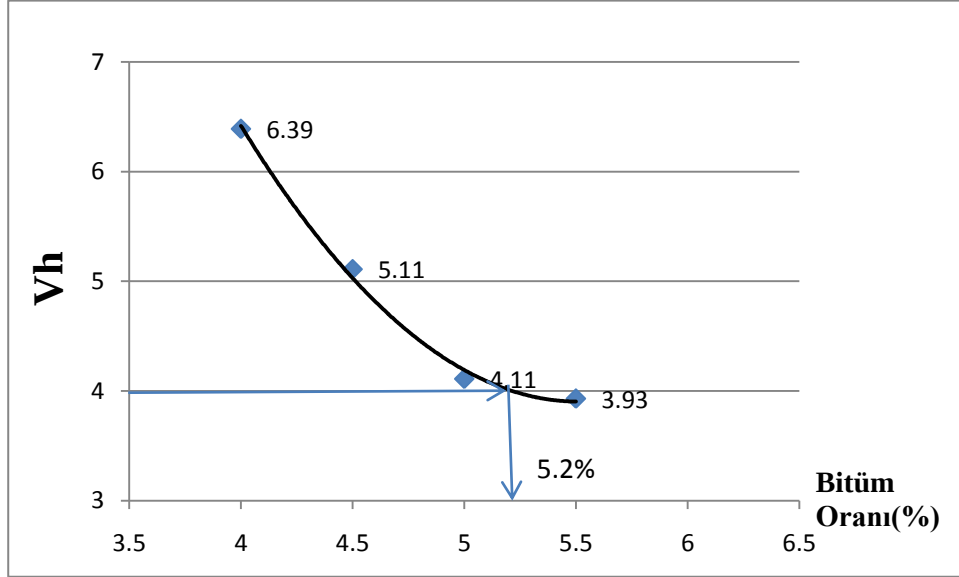


Şekil 28.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

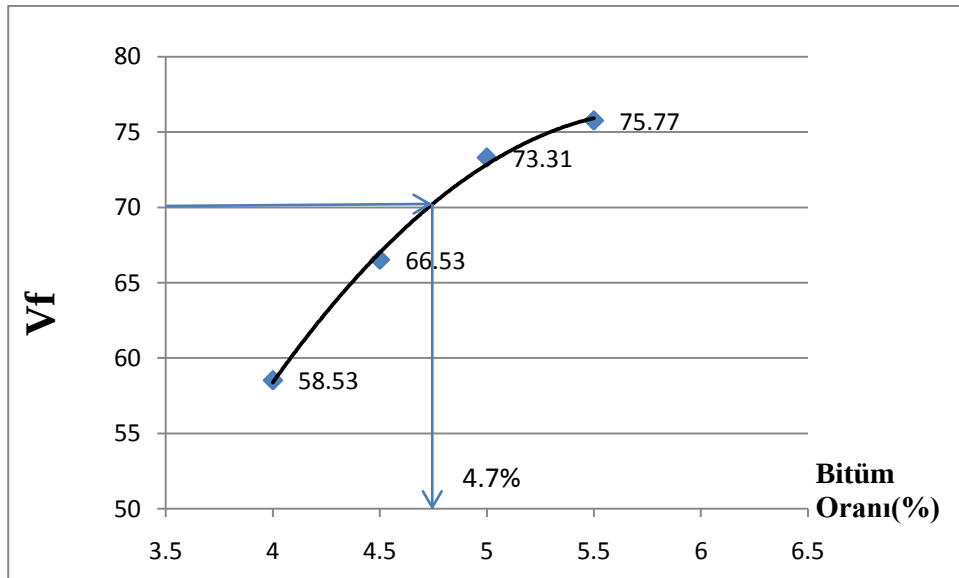


Şekil 28.2. Stabilité-Bitüm oranı grafiği

EK-28 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 VP Marshall tasarım grafikleri

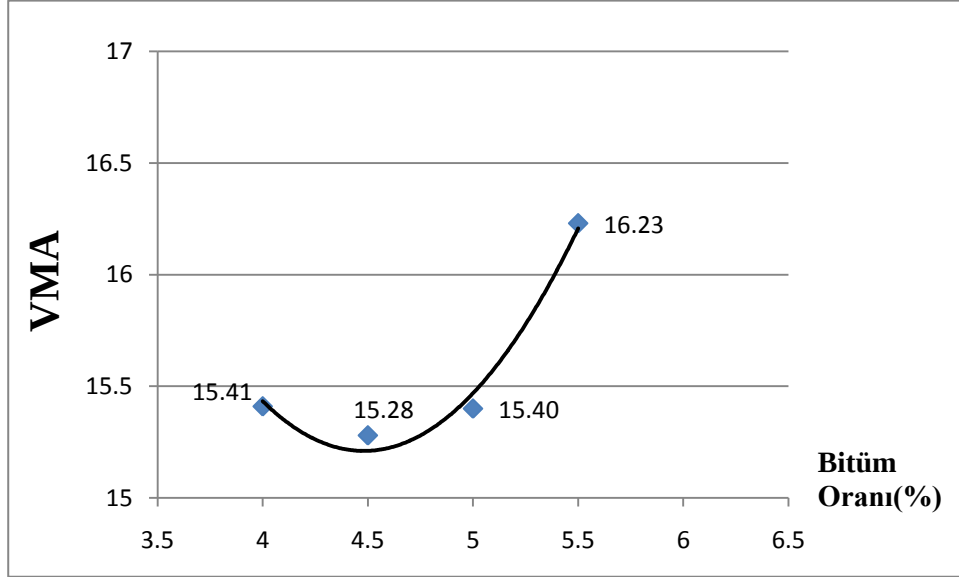


Şekil 28.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

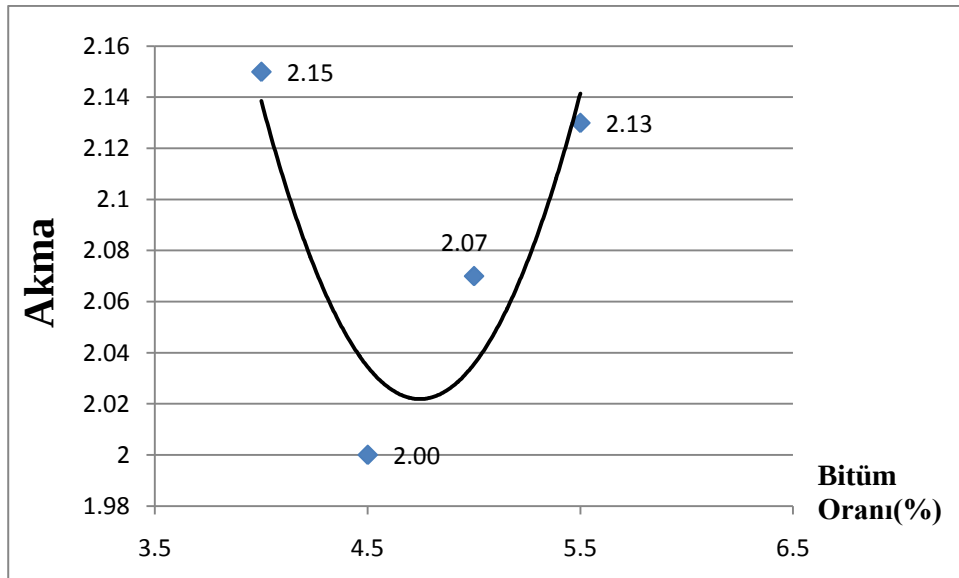


Şekil 28.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-28 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %2 VP Marshall tasarım grafikleri



Şekil 28.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

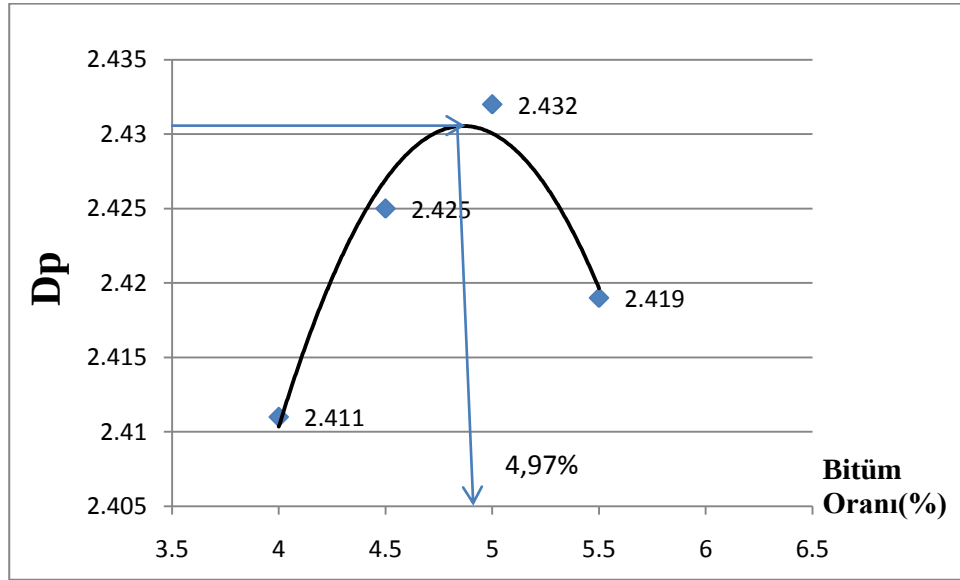


Şekil 28.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

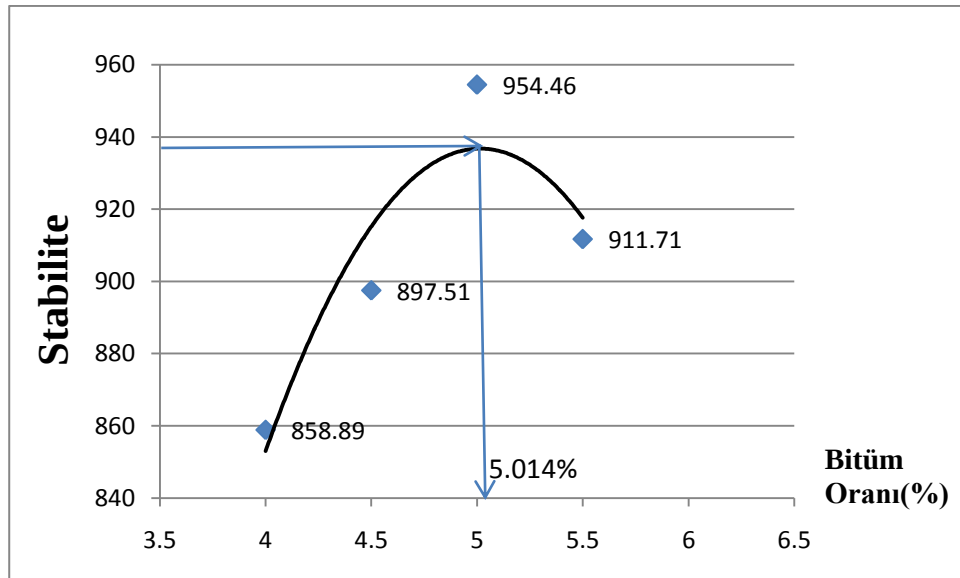
EK-29. %3 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.													
4,0/1			63,5	63,8	63,7	63,6	1210,5	709	1212	503	2.407					1,75	228	0,998	839,74
4,0/2	4,0	46	63,9	63,6	63,3	63,5	1211,5	711	1214	503	2.409	2,573	6,41	15,43	58,44	1,94	249	1	920,03
4,0/3			63,7	63,4	64,0	63,8	1213	712	1215,5	503,5	2.409					2,20	223	0,993	816,90
										ORT.	2,408					1,96			858,89
4,5/1			64,3	64,1	63,6	63,9	1214,5	716	1217	501	2.424					2,0	233	0,99	851,44
4,5/2	4,5	51,75	64	63,4	63,9	63,7	1211	713,5	1212,5	499	2.427	2,554	5,06	15,29	66,78	2,15	242	0,995	889,31
4,5/3			63,3	63,5	63,8	63,6	1213,5	715	1215,5	500,5	2.425					2,52	258	0,998	951,78
										ORT.	2,425					2,22			897,51
5,0/1			63,4	63,7	63,8	63,6	1216	718,5	1218	499,5	2.434					2,50	251	0,998	925,64
5,0/2	5,0	57,5	63,7	63,5	63,2	63,4	1215	717,5	1217	499,5	2.432	2,536	4,10	15,40	73,31	2,35	254	1,003	941,60
5,0/3			63,2	63,5	63,4	63,3	1213,5	716	1215,5	499,5	2.429					2,20	268	1,005	996,15
										ORT.	2,432					2,35			954,46
5,5/1			63,2	63,4	63,1	63,2	1214	714	1216,5	502,5	2,416					2,50	258	1,008	961,44
5,5/2	5,5	63,25	63,7	63,5	63,1	63,4	1215	715,5	1217,5	502	2,420	2,518	3,94	16,24	75,72	2,22	244	1,003	904,06
5,5/3			63,7	63,9	63,2	63,6	1218	717	1220	503	2,421					2,10	226	0,998	869,62
										ORT.	2,419					2,27			911,71

EK-30 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 VP Marshall tasarım grafikleri

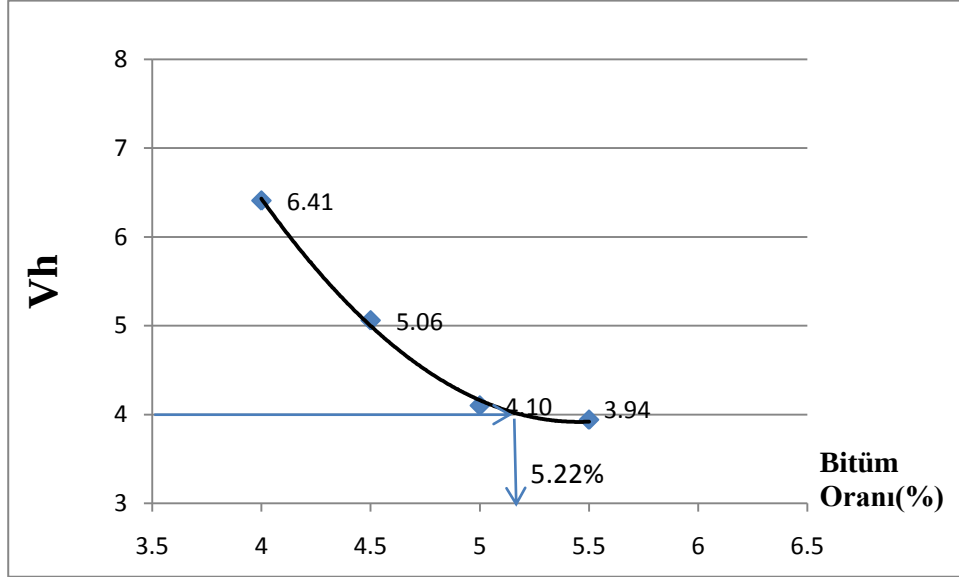


Şekil 30.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

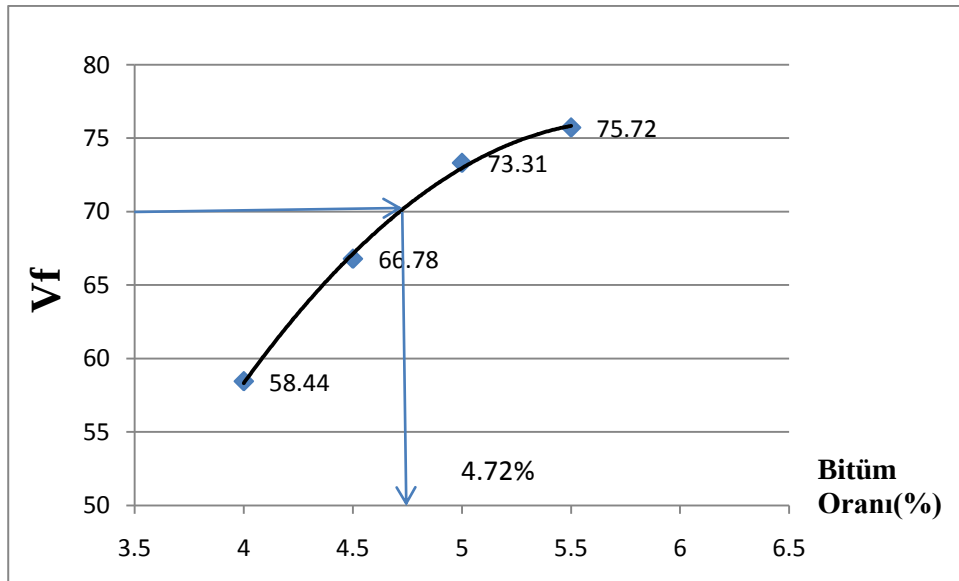


Şekil 30.2. Stabilité-Bitüm oranı grafiği

EK-30 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 VP Marshall tasarım grafikleri

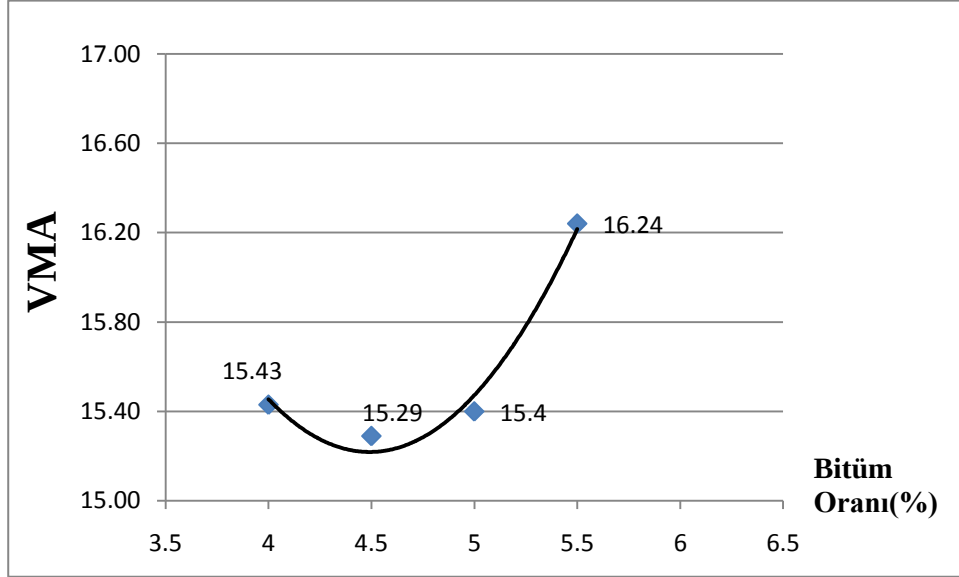


Şekil 30.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

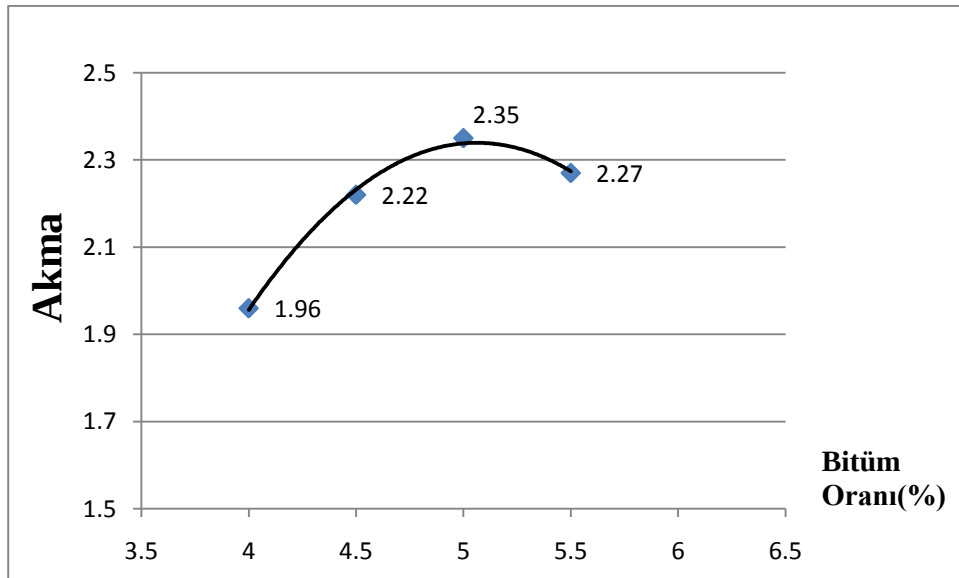


Şekil 30.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-30 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %3 VP Marshall tasarım grafikleri



Şekil 30.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

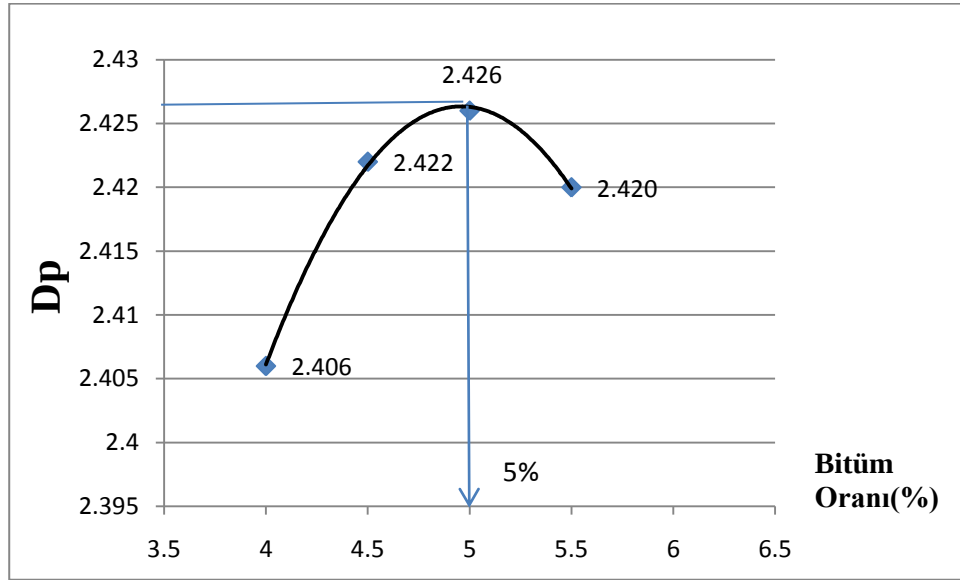


Şekil 30.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

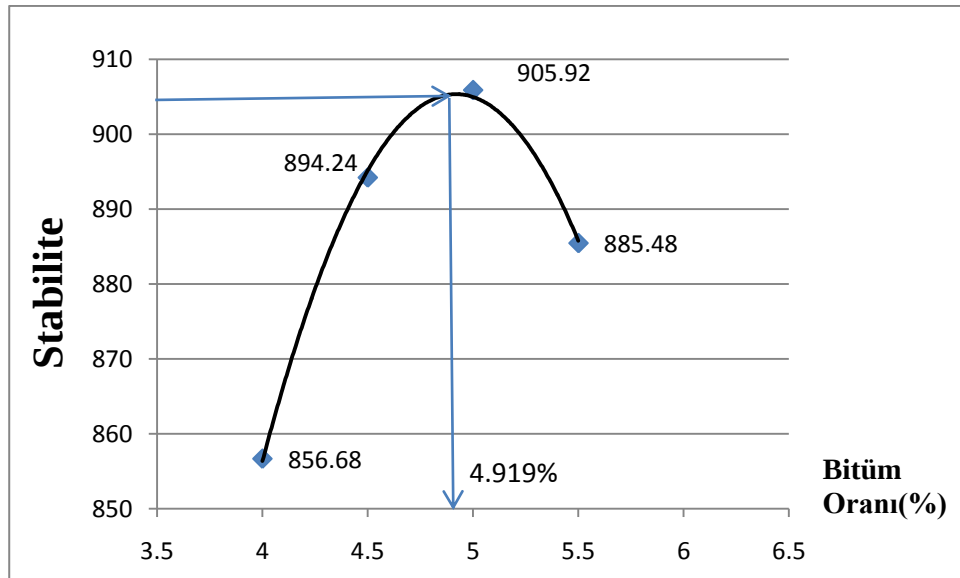
EK-31 %5 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)			Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.												
4,0/1			63,5	63,4	64,0	63,7	1210	711	1213	502	2.410				1,95	218	0,995	799,95
4,0/2	4,0	46	63,9	63,7	63,3	63,6	1208	709	1211,5	502,5	2.404	6,48	15,49	58,17	1,88	227	0,998	836,01
4,0/3			63,2	63,5	63,6	63,4	1206	708	1209,5	501,5	2.405				2,60	252	1,003	934,09
									ORT.	2,406					2,14			856,68
4,5/1			63,8	63,2	63,3	63,5	1211	713,5	1214	500,5	2.420				1,80	242	1	893,84
4,5/2	4,5	51,75	63,4	63,9	63,8	63,7	1213,5	715,5	1215,5	500	2.427	5,19	15,35	66,19	1,92	236	0,995	866,97
4,5/3			63,8	63,9	63,1	63,6	1212	714	1215	501	2.419				2,15	250	0,998	921,91
									ORT.	2,422					1,96			894,24
5,0/1			63,9	63,5	63,4	63,6	1214	716,5	1216	499,5	2,430				2,40	257	0,998	948,05
5,0/2	5,0	57,5	63,4	63,1	63,2	63,3	1211	714	1214	500	2,422	4,35	15,62	72,10	2,30	240	1,005	890,84
5,0/3			63,9	63,2	63,4	63,5	1212,5	715	1215	500	2,425				2,50	238	1	878,87
									ORT.	2,426					2,40			905,92
5,5/1			63	63,1	63,4	63,2	1213	714,5	1216	501,5	2,419				2,30	246	0,995	904,21
5,5/2	5,5	63,25	63,3	63,4	63,7	63,5	1216	715,5	1217,5	502	2,422	3,90	16,21	75,90	2,65	238	1	878,87
5,5/3			63,9	63,2	63,7	63,6	1217	716	1219	503	2,419				2,50	237	0,998	873,36
									ORT.	2,420					2,48			885,48

EK-32 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 VP Marshall tasarım grafikleri

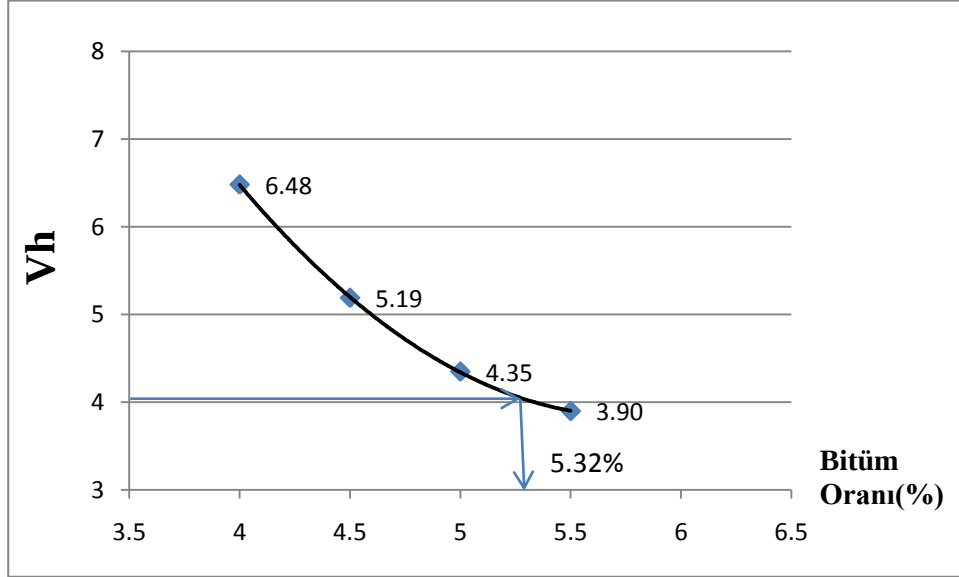


Şekil 32.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

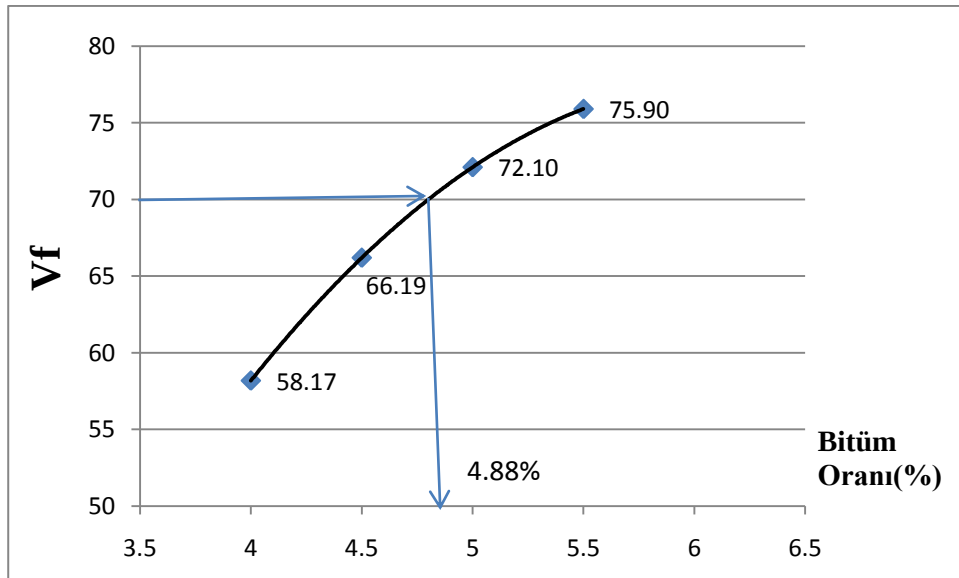


Şekil 32.2. Stabilité-Bitüm oranı grafiği

EK-32 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 VP Marshall tasarım grafikleri

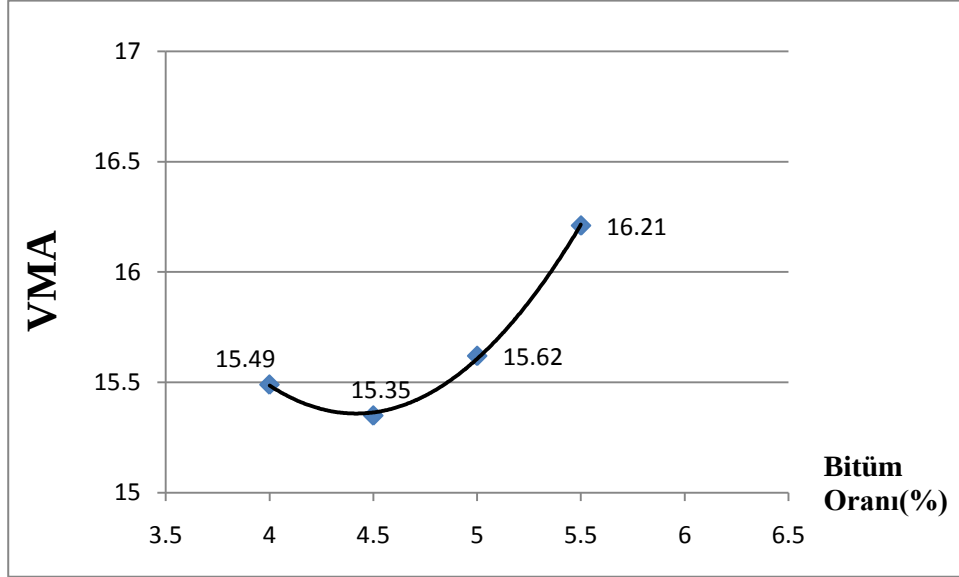


Şekil 32.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

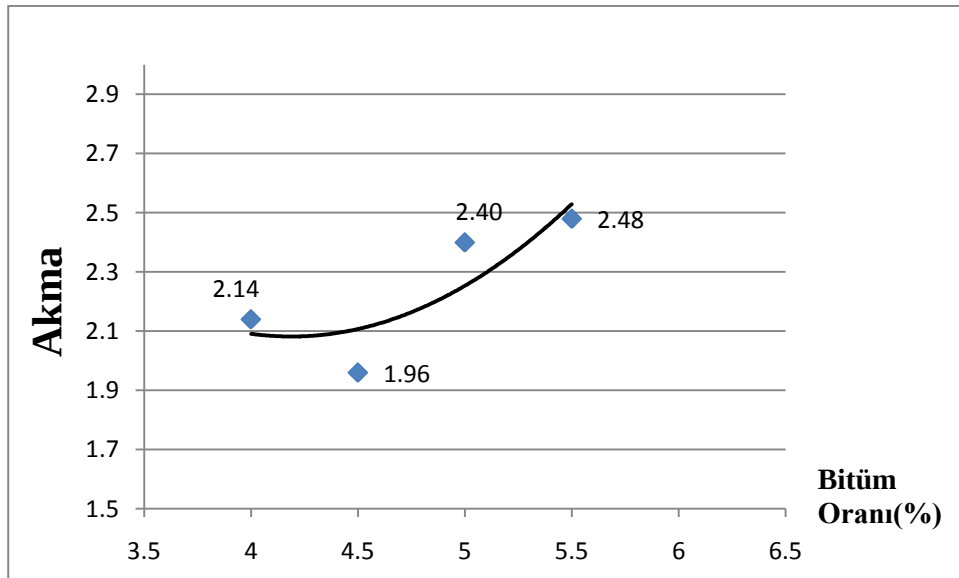


Şekil 32.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-32 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %5 VP Marshall tasarım grafikleri



Şekil 32.5. VMA-Bitüm oranı grafiği

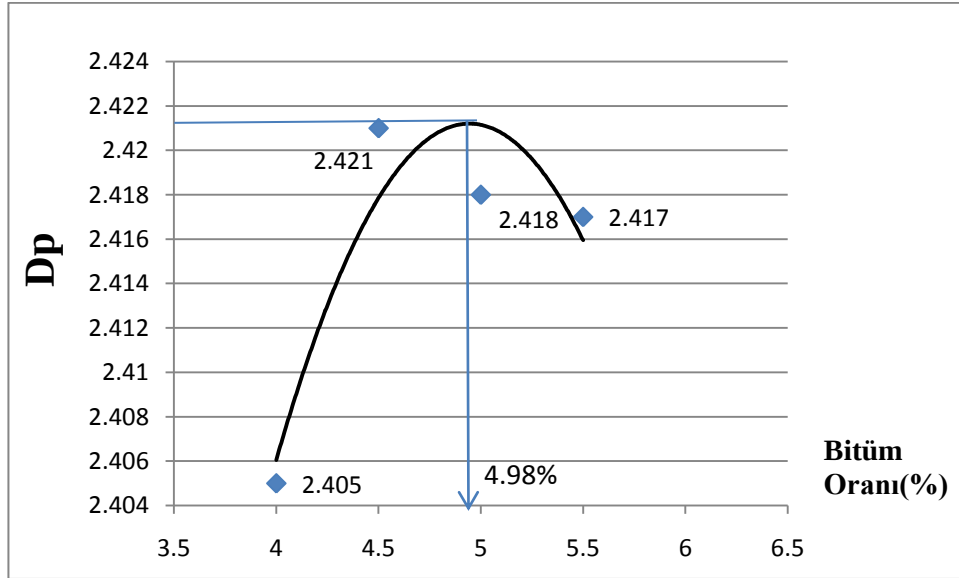


Şekil 32.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

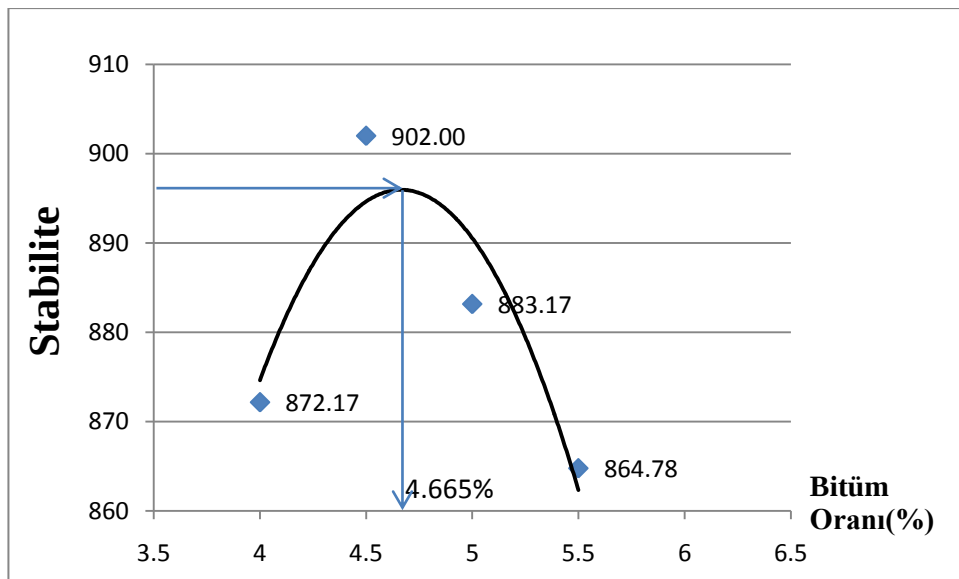
EK-33 %10 VP ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

	Bitüm		Briket Yüksekliği (mm)			Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK Ağırlık (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
Briket No	Wa	gr	1	2	3	ORT.												
4,0/1			63,7	63,5	63,4	63,4	1208	709	1210,5	501,5	2.409				2,50	238	1,003	881,54
4,0/2	4,0	46	63,9	63,2	63,7	63,6	1206	707	1209	502	2.402	2,573	15,54	57,94	2,30	244	0,998	899,50
4,0/3			63,4	63,6	64,4	63,8	1209	710	1213	503	2.404				1,90	228	0,993	835,48
									ORT.	2,405					2,23			872,17
4,5/1			63,9	63,4	63,5	63,6	1212	713,5	1214,5	501	2,419				2,15	248	0,998	914,44
4,5/2	4,5	51,75	63,2	63,4	63,1	63,3	1210	712,5	1212	499,5	2,422	2,554	15,37	66,07	2,00	246	1,005	913,41
4,5/3			63,3	63,6	64,1	63,7	1213,5	714,5	1215,5	501	2,422				2,32	239	0,995	878,14
									ORT.	2,421					2,16			902,00
5,0/1			63,4	63,5	63,0	63,3	1212	713	1214,5	501,5	2,417				2,00	237	1,005	879,56
5,0/2	5,0	57,5	63,7	63,8	63,3	63,6	1216	716	1218,5	502,5	2,420	2,536	15,91	70,55	2,22	235	0,998	865,88
5,0/3			63,1	63,6	63,5	63,4	1214	714,5	1217	502,5	2,416				2,50	244	1,003	904,06
									ORT.	2,418					2,24			883,17
5,5/1			63,0	63,2	63,4	63,3	1213	713	1215,5	502,5	2,414				2,40	234	1,005	868,28
5,5/2	5,5	63,25	63,3	63,4	63,8	63,5	1215	715	1217,5	502,5	2,418	2,518	16,28	75,49	2,15	236	1	871,39
5,5/3			63,7	63,4	63,7	63,6	1216	716	1218	502	2,422				2,50	232	0,998	854,68
									ORT.	2,417					2,35			864,78

EK-34 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 VP Marshall tasarım grafikleri

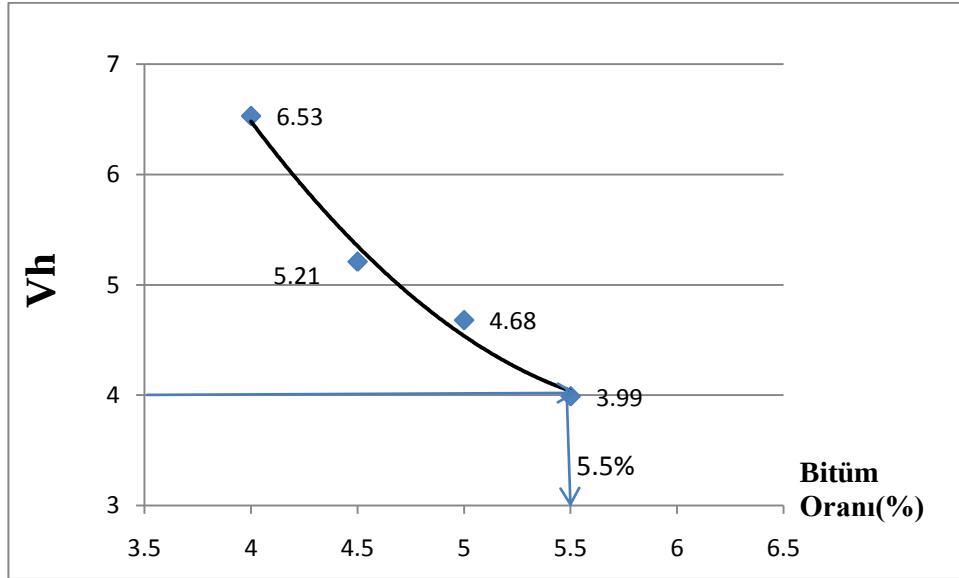


Şekil 34.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

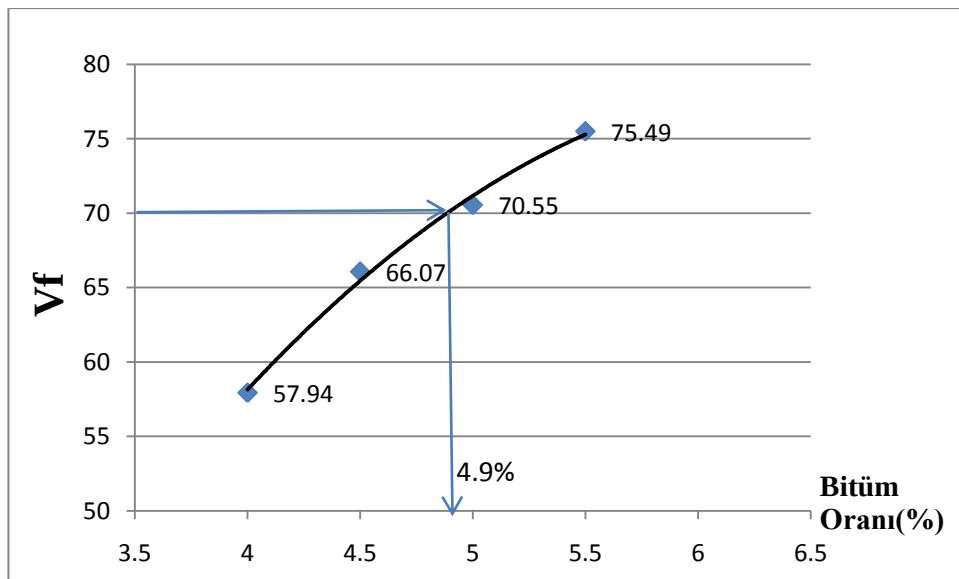


Şekil 34.2. Stabilité-Bitüm oranı grafiği

EK-34 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 VP Marshall tasarım grafikleri

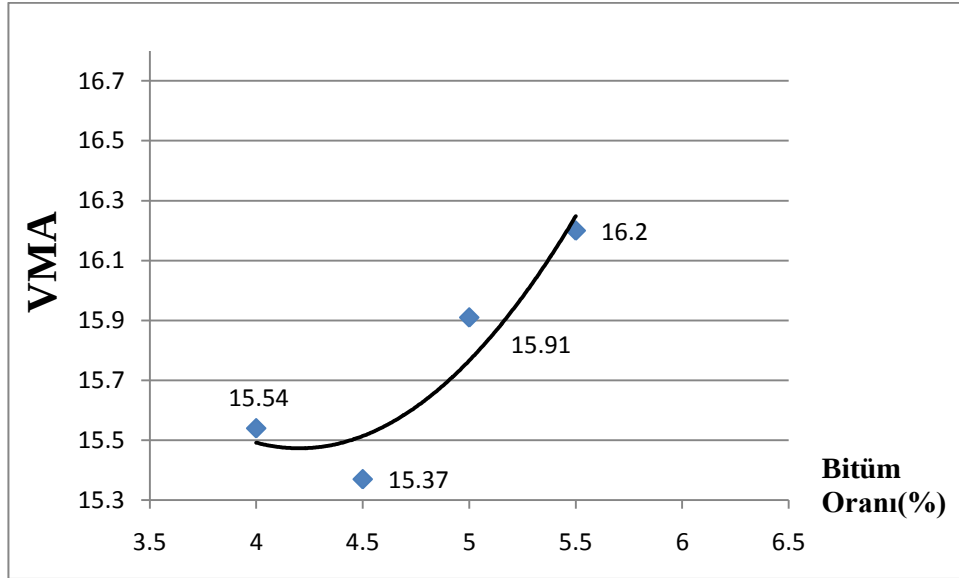


Şekil 34.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

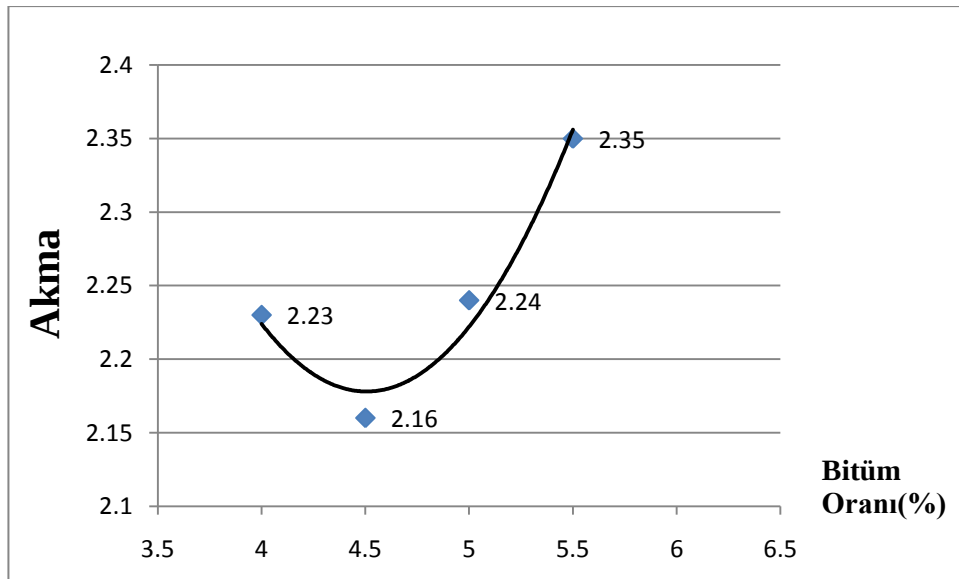


Şekil 34.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-34 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan %10 VP Marshall tasarım grafikleri



Şekil 34.5. VMA-Bitüm oranı grafiği



Şekil 34.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

EK-35 Superpave test cihazları



Resim 35.1. BBR test cihazı



Resim 35.2. DSR test cihazı

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : FARZANIAN, Seyyed Ali

Uyruğu : İran

Doğum tarihi ve yeri : 11.09.1987 Marand

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 507 601 38 13

e-mail : a.farzanian66@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Marand Azad Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2009
Lise	Marand Şehit Beheşti Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-2009	Marand, Betonarme Binası	Şantiye Şefi

Yabancı Dil

İngilizce, Türkçe